役にたつエレクトロニクスの総合誌
https://toragi.cqpub.co.jp/
ISSN 0040-9413
昭和39年12月26日第3種郵便物認可
令和8年1月1日発行（毎月1回1日発行）第63巻 第1号 通巻第736号

トランジスタ技術

2026
1

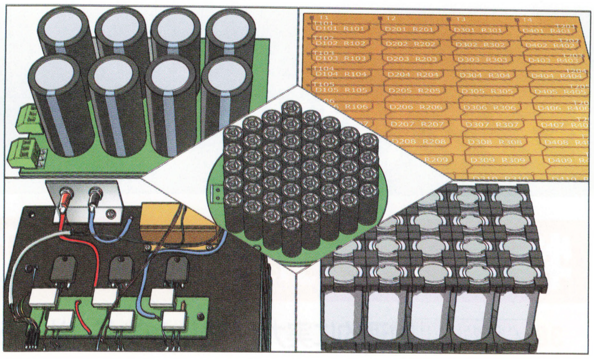
実力けた違い！ 小回路アレイの数理

小っさい回路で大っきい効果！



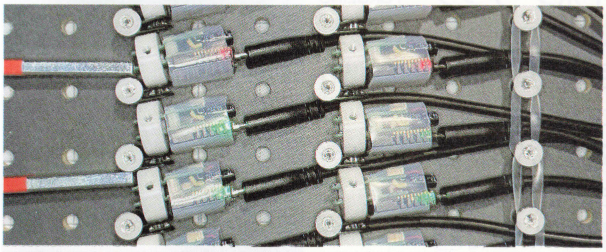
CONTENTS
トランジスタ技術 1

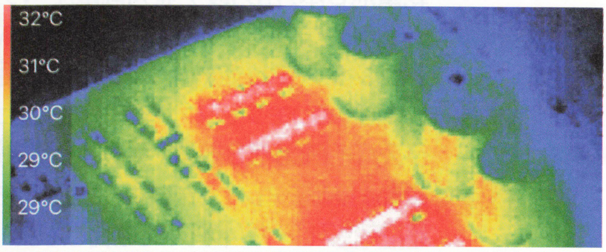
2026 第63巻 第1号 通巻第736号
Transistor Gijutsu
https://toragi.cqpub.co.jp/

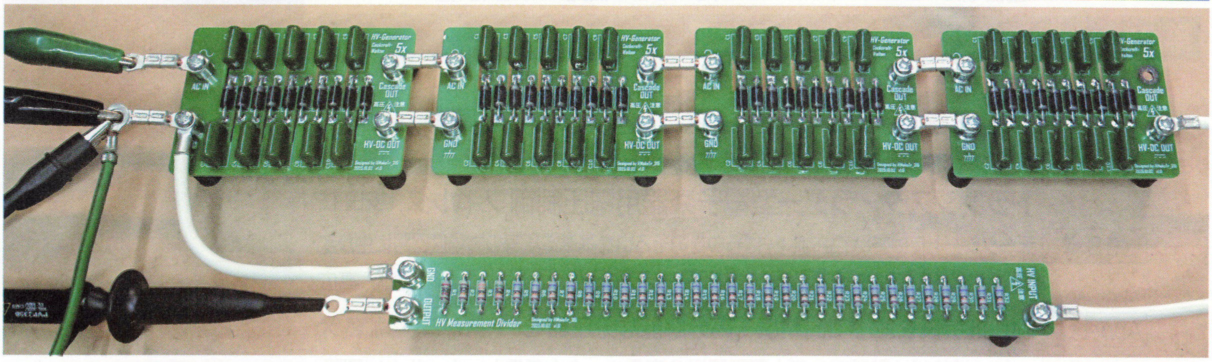


特集 実力けた違い! 小回路アレイの数理

小っさい回路で大っきい効果!







企画❶ 新春 トラ技読者オフ会開催

並べる&アレイ回路を持ち寄って,
みんな集まアレイ

- 日時:2026年2月上旬予定
- 定員:20名
- 場所:東京・巣鴨駅 CQ出版ビル
- 詳細:トラ技イベント情報

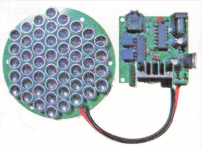
Connpass

詳細は,SNSやメルマガ,Webサイトで発信していきます.チェックをお忘れなく!

企画❷ お年玉 読者プレゼント祭り

- パラメトリック・スピーカ実験キット
- NanoVNA-H4 4インチ表示 1.5GHzネットワーク・アナライザ
- ディジタル・マルチメータ CD5002
- 最新型! USBケーブルチェッカー3
- SiCトレンチMOSFETを10個

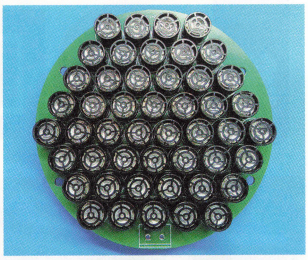
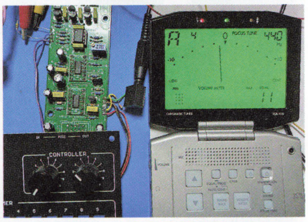
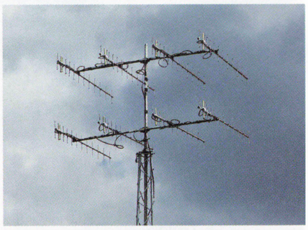
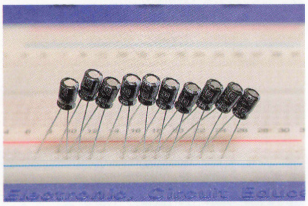
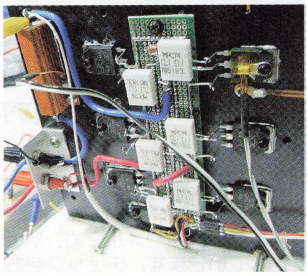
ほか



トランジスタ技術 1

マーク付きの記事は関連データを公開中です．
https://toragi.cqpub.co.jp/download2026/

特集　実力けた違い！ 小回路アレイの数理

CONTENTS

本文イラスト，図面製作／神崎 真理子，㈲新生社

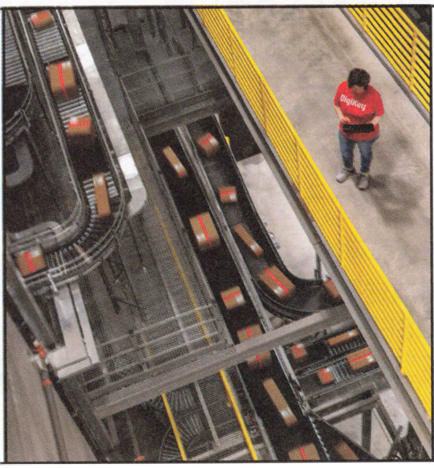
★お詫び　注目マイコン探訪は，休載させていただきます．

トランジスタ技術 1 広告索引

50音別

製品分類別

表紙解説



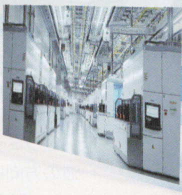
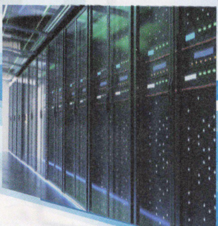
DigiKeyは世界有数の総合的な電子部品ディストリビュータです。DigiKeyは創業以来、サービス内容と諸実績を重視し、一流メーカーから直接仕入れた業界トップクラスの製品を世界中のお客様に提供してきました。この継続的な取り組みにより、お客様から高い評価をいただいています。学生と技術者に向けた少量の試作・設計用部品から、購買担当者に向けた量産用部品に至るまで、多種多様な製品を幅広いお客様にお届けしています。www.digikey.jpにアクセスして、DigiKeyの膨大な製品とリソースを是非ご覧ください。
DigiKeyは、お客様のプロジェクトを成功へと導くお手伝いをいたします。

DigiKey

セイコーエプソン社製プログラマブル水晶発振器
プログラミング済み製品販売のご案内

選んで大正解！水晶発振器が
1個から希望周波数・仕様を最短3日で出荷！




欲しいときにすぐに入手可能!!

Pb Free　RoHS Compliant



CAパッケージ (7.0×5.0mm)　CBパッケージ (5.0×3.2mm)　CEパッケージ (3.2×2.5mm)　CGパッケージ (2.5×2.0mm)　CJパッケージ (2.0×1.6mm)

EPSON

プログラマブル水晶発振器は、任意の出力周波数を設定して書き込むため、短納期・少ロットにも対応することができます

	プログラマブル水晶発振器 (P-SPXO)				
出力:CMOS	SG-8018シリーズ (標準品)	SG-8101シリーズ (高精度)	SG-8200シリーズ (低ジッタ・高温度対応)	SG-8201シリーズ (高精度・低ジッタ・高温度対応)	SG-9101シリーズ (スペクトラム拡散機能付き)
電源電圧	1.62V～3.63V (1.8V/2.5V/3.3V Typ.)				
出力周波数範囲	0.67MHz～170MHz		1.2MHz～170MHz		0.67MHz～170MHz
周波数許容偏差/動作温度	±50×10⁻⁶/-40℃～+105℃	±15×10⁻⁶/-40℃～+85℃ ±20×10⁻⁶/-40℃～+105℃ ±50×10⁻⁶/-40℃～+105℃	±50×10⁻⁶/-40℃～+125℃	±15×10⁻⁶/-40℃～+105℃ ±25×10⁻⁶/-40℃～+125℃	±50×10⁻⁶/-40℃～+85℃ ±50×10⁻⁶/-40℃～+105℃
シリーズ型番	—	—	SG-8200CJ	SG-8201CJ	—
	SG-8018CG	SG-8101CG	SG-8200CG	SG-8201CG	SG-9101CG
	SG-8018CE	SG-8101CE	—	—	SG-9101CE
	SG-8018CB	SG-8101CB	—	—	SG-9101CB
	SG-8018CA	SG-8101CA	—	—	SG-9101CA

＊CJ/CG/CE/CB：100pcsより、リール品で納品対応いたします　＊CA：Tube品で納品対応いたします(リール品でも対応可)

タクミ商事株式会社は、量産書込み品質保証システム認証を取得して、
ハンドラー装置(自動機)で量産書込みができる国内唯一の代理店です

IC/半導体、電子部品販売、輸出入業務

タクミ商事株式会社
TAKUMI SHOJI CO., LTD.
〒163-1129 東京都新宿区西新宿6-22-1 新宿スクエアタワー 29F
TEL. 03-3343-9630(代)　FAX. 03-3343-9621

タクミ商事の通販サイト「セミコンボックス」
https://www.semiconbox.com

タクミ商事 エレクトロニクス事業国内関連会社

エレクトロニクス総合商社
アロマン株式会社
〒214-0014 神奈川県川崎市多摩区登戸3508 コアクレスト登戸1F
TEL. 044-934-0034(代)　FAX. 044-934-0017・0788

株式会社デンソ
〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-5 ディアマントビル4F
TEL. 03-3251-6766(代)

マイクロサミット株式会社
〒101-0038 東京都千代田区神田美倉町1 プルミエKIビル
TEL. 03-3258-5531(代)　FAX. 03-3258-0433

Technoasty Corporation
テクノアスティー株式会社
〒182-0024 東京都調布市布田4-5-1 藍澤調布ビル5F
TEL. 042-444-4982　FAX. 042-444-4983

吸収体の角度特性をレイトレース法の演算に導入

電波暗室設計のための電磁界解析

無線通信機器からマイクロ波 / ミリ波などの高周波応用機器, EMI 特性が問題となる広範な電子機器にいたるまで, 特性の測定, 評価に電波暗室が不可欠です. 電波暗室は, シールドルーム内部にピラミッド型吸収体を敷き詰めることによって, 外部との電磁波の干渉を防ぐとともに, 内部の反射波を抑制して自由空間と同等の電磁界環境を実現します.

電波暗室の設計では, 電波暗室全体の特性を解析して, 吸収体の種類, サイズ, 配置などを決定する必要があります. しかし, 広帯域の電磁界解析を行うには電波暗室はかなり大型であり, 演算コストが膨大になります. 従来は, 演算量を大幅に削減できるレイトレース法で解析を行っていますが, 十分な精度が得られないという問題があります.

マイクロ波 / ミリ波測定のエキスパートとして知られるマイクロウェーブファクトリーでは, 電波暗室設計を数多く行っており, 設計に必要な電磁界解析技術についても精度向上とコスト低減を両立する研究開発を進めています. ここでは, その成果の一つとして, レイトレース法をベースにしながら大幅に解析精度を向上した解析技術を紹介します.

●電波暗室の吸収体

電波暗室では, 広帯域にわたって吸収性能が得られるピラミッド型吸収体が広く使われています(図 1). これは, 導電性材料の空間的な密度を徐々に増加させる構造をとることで, 空間のインピーダンスと吸収体のインピーダンスを整合させるように作られています.

吸収体に放射された電磁波のエネルギは, 伝搬の過程で吸収体の誘電体損失によって熱になることで吸収されます(図 2).

電波暗室は, シールドルームの内面をこの吸収体で覆って内部での反射を抑制し, 自由空間に近い環境を実現します. そのため, 電波暗室の設計時には電波暗室全体にわたって電磁界特性を解析し, 十分な特性が得られるように吸収材の種類, サイズ, 配置などを決定することが必要です.

図 1　ピラミッド型吸収体

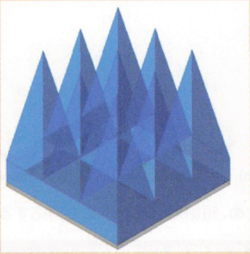
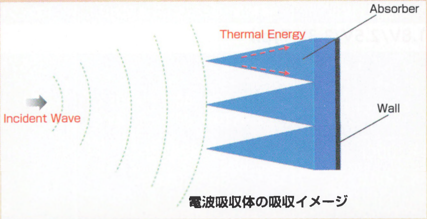


図 2　吸収の原理(イメージ)



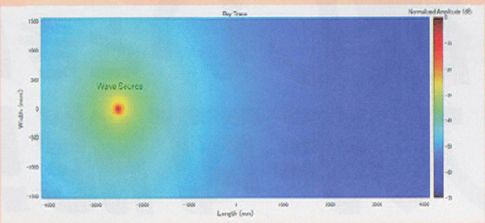
●電波暗室の吸収体

高精度の電磁界解析に用いられる FDTD 法は, 解析対象が大型の場合や高周波の解析が必要な場合に演算量が膨大になります. そこで, 電波暗室の解析では, 演算量を大幅に低減できるレイトレース法が一般に用いられています.

レイトレース法は光の伝搬特性の解析に広く用いられる手法で, 反射は正規反射だけ, 回折はナイフエッジ回折だけの単純なモデルで解析を行います. これを電波暗室の解析に利用する場合は, 吸収特性を反射係数によって模擬します. 従来は, 吸収体の形状を平面モデルに置き換え, 比誘電率が徐々に変化するマルチレイヤシートのモデルで等価的に吸収体の特性を解析する手法を用いてきました.

ピラミッド型の繰り返し構造である実際の吸収体は, 入射する電磁波の方向による角度特性をもち, 干渉縞状の電界分布を生じます. しかし, 従来のレイトレース法ではそれが再現されず, 解析精度が低いという問題があります(図 3).

図 3　-40dB のマルチレイヤシートモデルによるレイトレース法の解析結果(1GHz)



実際には図 8 のように吸収体の角度特性による干渉縞を生じるが, 従来のレイトレース法では再現できない.

●角度特性を組み込んだ電波暗室の解析

マイクロウェーブファクトリーでは, 電波暗室の解析精度を向上する研究を行っています. その一つとして, 実測した物性値を用いてピラミッド型吸収体の角度特性を解析し, そのデータをレイトレース演算に組み込むことによって高精度の解析結果を得るという手法を提案しています. ここで, 改善した手法による解析事例とその評価を紹介します.

本事例では, ピラミッド型吸収体(E&Cエンジニアリング製, VHP-12)を用いて, 周波数 1GHz で解析を実施しました. 今回提案する角度特性を考慮したレイトレース法と, FDTD 法の解析を行って結果を比較します.

(a) 吸収体の物性値の決定

まず, 吸収体の比誘電率を実測して, 1GHz における比誘導率 Er=3.42, 誘電正接を tanδ = 1.11 と決定しました.

(b) 有限要素法(FEM)で平面波に対する角度特性を解析

次に, 有限要素法の無限周期構造のモデルに平面波を入射したときの吸収体の角度特性を解析します(図 4).

吸収体の X-Y 面に無限集子構造を適用し, -Z 方向に平面波を伝搬させます. 正面方向 (ϕ=0deg, θ=0deg) から入射させた場合の吸収性能は図 5 になり, データシートの値とグラフが一致していることが分かります.

また, 吸収性能の角度特性は図 6 になります. TM 波と TE 波を比較すると, 位相特性に大きな違いがあります. レイトレース法に適用する場合, TM 波, TE 波それぞれの角度特性を組み込む必要があります.

図4　周期境界条件を用いた吸収体のモデル

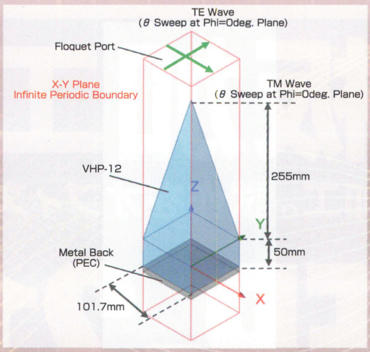


図5　正面方向から入射させたときの吸収性能の周波数特性

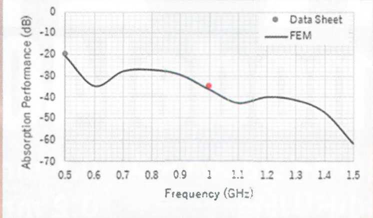
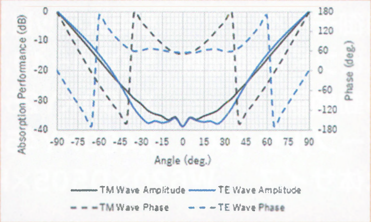


図6　吸収性能の角度特性



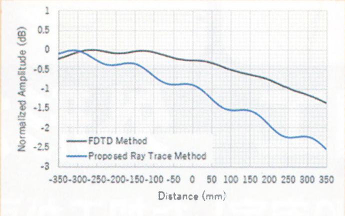
(c) 角度特性を組み込んだレイトレース法で電波暗室を解析

この角度特性を，レイトレース法の壁面の境界条件に組み込んで解析を行いました．電波暗室のサイズは 3750×8950×3950mm で，送受信間の距離は 5m としています．

受信アンテナ位置に対して X-Y 方向に ±350mm の観測線を設けて，解析した振幅特性を FDTD 法と比較した結果を図 7 に示します．傾向が同じであり差分は 1.0dB 以内さらに，X-Y 平面の全域における電界強度分布の比較を図 8 に示します．角度特性を組み込んだレイトレース法では，FDTD 法と同様の干渉縞パターンが得られています．

図7　振幅特性の解析値

(a) 観測線 Y 軸（1GHz）



(b) 観測線 X 軸（1GHz）

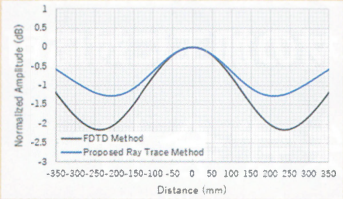
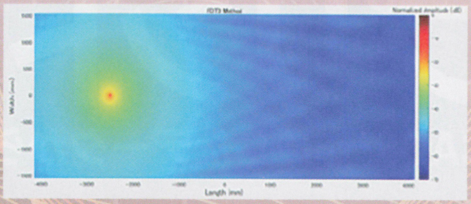
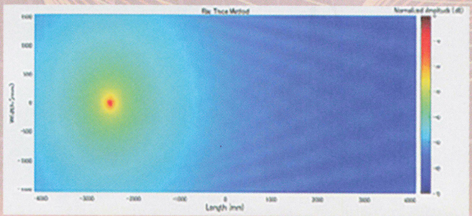


図8　電界強度分布の比較　(a) FDTD 法



(b) 角度特性を組み込んだレイトレース法



FDTD 法と角度特性を組み込んだレイトレース法の相関係数は 0.97 と高い．

●新しい解析手法の評価

吸収体の角度特性を組み込む改良を加えたレイトレース法によって，FDTD 法に近い高精度の解析ができることが分かりました．

さらに，同じ PC で計算コストを比較したところ，表 1 のように，FDTD 法では 3 時間かかる計算を，角度特性を組み込んだレイトレース法は 1 分で実行できました．しかも，FDTD 法は GPU ですが，改良したレイトレース法は CPU で演算しています．使用メモリも，FDTD 法が 16GB 必要なのに対して，改良したレイトレース法では 0.5GB です．

吸収体の角度特性を組み込むことによって，レイトレース法の低コストを受け継ぎながら，解析精度を FDTD 法に近づけられる可能性があることが分かりました．

表 1　解析の計算コストの比較

	計算時間	必要メモリ
改良レイトレース法	1min	0.5GB
FDTD 法	3h	16GB

●マイクロウェーブファクトリーについて

マイクロウェーブファクトリーは，2003 年の創業以来，マイクロ波やミリ波の計測に特化して，コンサルティング・インテグレーション事業，製品販売事業，計測サイト事業の三つの事業を進めてきました．2014 年には，世界中の先進的な商品を扱う総合商社のコーンズグループの一員となり，調達力や資本力が強化されました．

さらに，2020 年 1 月よりマイクロウェーブファクトリーと E&C エンジニアリングが組織統合し，Cornes RF Engineering というグループ名にて業務を開始しました．

電波分野で独自の強みを発揮してきた Corns，マイクロウェーブファクトリー，E&C エンジニアリングの 3 社によって誕生した，日本国内唯一の，電波に関するトータルソリューション・プロバイダーとして，さらなる発展を続けていくことが期待されます．

Classembly Devices® × Classembly Software®

MADE IN 日本

特許第 7436072 号

セキュリティ対策ネットワーク絶縁装置

繋げないネットワーク

ゼツエン犬®



Point 1 | **情報資産を守る**

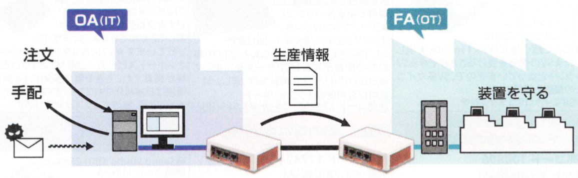
外部ネットワークとの直接通信を排除し、ネットワーク経由の攻撃や情報漏洩のリスクを未然に防止します

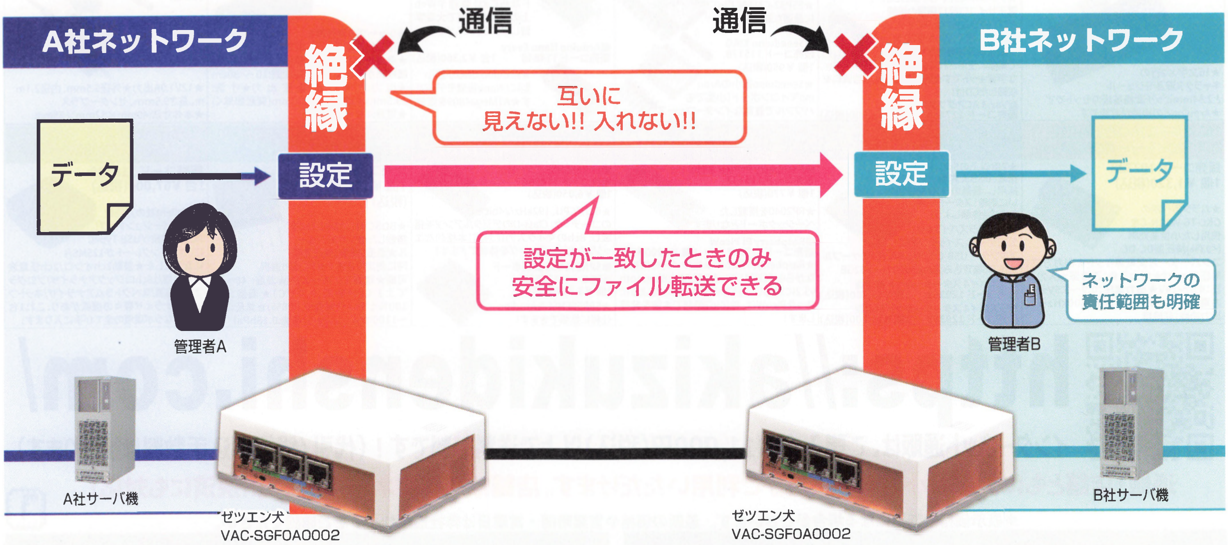
Point 2 | **セキュアなファイル共有**

安全かつ効率的にファイルを送受信
リスクを封じ込めながら、業務効率を高めます

Point 3 | **USBメモリ利用のリスク**

USBメモリ利用時の紛失・盗難管理、ウイルスチェック
ゼツエン犬なら、システムとして自動化できます





Interface®
株式会社インタフェース

詳しくはwebsiteまで www.interface.co.jp

☎ TEL：050-3032-9900 ✉ E-mail：sales@interface.co.jp

製品の仕様、デザイン、価格については、予告なく変更する場合があります。本広告に記載した会社名、商品名は、各会社の商標または登録商標です。

SAMT-25-100914-01

実験・研究にオススメ

農業，測量などの位置測位や，急回転するドローンの方向制御に

センチメートル衛星測位評価キット

新発売キャンペーン中！ 数量限定で 2大特典付き

(1) ヨコオ製全周波パッチ・アンテナYOZ-52728
(2) 米国Point One Navigation社の期間限定Ntripライセンス

● 4周波コンパス＆RTK小型モジュール
価格：79,970円（税込）



アンテナを2個使うことで0.15°精度（アンテナ間が1m）の方位測定を可能にした受信モジュールmosaic-G5 P3Hの評価キットです．RTK測位にも対応します．Raw（生）データを出力できません．

● 4周波小型RTK測位モジュール
価格：税込79,970円（税込）

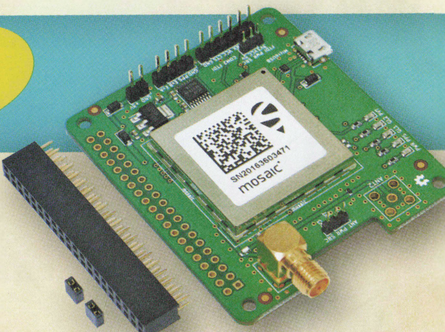
測位衛星信号の受信と，補正データとなる基準局信号のデータを組みあわせ，cm精度の測位を可能にするRTK測位モジュールmosaic-G5 P3の評価キットです．アンテナ接続用のSMA端子は2個ありますが，対応アンテナは1個です．

▶ mosaic-G5 P3とP3H共通の特長

- cm精度の測位には，有線シリアル通信またはUSB経由で基準局データを入力する必要があります．
- GPSのL1，L2，L5，みちびきのL1，L2，L5，L6，GalileoのE1，E5a，E5b，E6，BeidouのB1C/B1I，B2a，B2b/B2I，B3，GLONASSのG1，G2，G3に対応します．
- セプテントリオ社純正ツールRxToolsを使って動作を設定します．mosaic-G5はWebブラウザから動作設定を行う機能がありません．
- mosaic-go評価キットは動作検証向けの製品です．堅牢性が求められる環境でのご使用はお控えください．
- おひとり様，最大5個までのご購入が可能です．

RTK受信機　mosaic-X5搭載 L1，L2，L5の3周波を扱える高性能

3周波！



● 評価キット（アンテナ付き）　価格：104,500円（税込）

mosaic-X5搭載の評価キット．USB I/F，シリアル通信ポート×2（ケーブル付属），TFカード（microSDカード互換）のソケットがある．L1，L2，L5，L6対応のGNSSアンテナAH-4236（中国Hi-Target）とSMA延長ケーブルが付属



● 評価キット（アンテナなし）
価格：89,100円（税込）

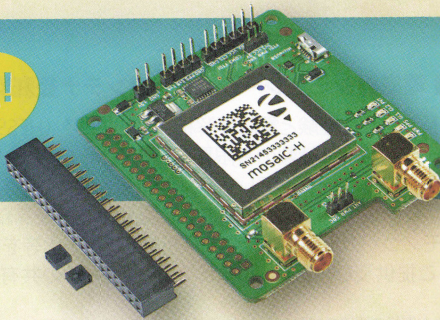
● 組み込み向けボード（アンテナなし）
価格：93,500円（税込）

mosaic-X5搭載のRaspberry Piのハードウェア拡張基板（HAT基板）．USB接続でパソコンと組み合わせての利用も可能．アンテナは付属しないので，L1，L2，L5対応のGNSSアンテナが別途必要

RTK受信機　mosaic-H搭載 アンテナを2個接続して「方向」も取得する

測位・方位！





mosaic-H（セプテントリオ）搭載の評価キット．
L1，L2の2周波，2アンテナに対応し，
位置と方向が測位できる

● 評価キット（アンテナなし）
価格：89,100円（税込）

● 評価キット（アンテナ2個付き）
価格：121,000円（税込）

● 組み込み向けボード（アンテナなし）
価格：93,500円（税込）

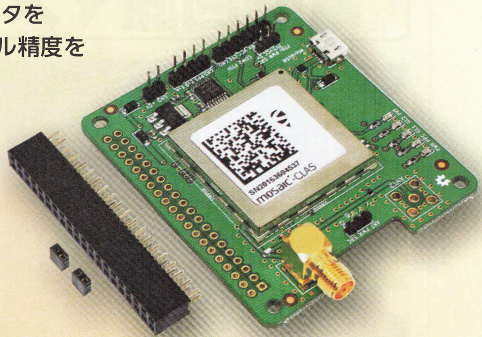
CQ出版WebShop　〈直接販売商品〉　**https://shop.cqpub.co.jp/**

衛星測位システムGPSは単体だと数メートル程度の精度しか得られませんが，地上に設置した基準局や，準天頂衛星「みちびき」の信号を使用することで数センチの精度が得られるようになります．ここでは，個人でもセンチメートル級の測定が可能なキットやモジュールを紹介します．

CLAS受信機　mosaic-CLAS搭載
L1, L2, L6を受信して単独でセンチメートル精度が得られる

CLAS!

mosaic-CLAS（セプテントリオ）は，RTKが本来必要とする基準局からのデータを準天頂衛星みちびきから受信することで，衛星信号の受信だけでセンチメートル精度を実現する衛星測位システムCLAS（シーラス）に対応する受信機．



- **評価キット（アンテナ付き）**
  価格：104,500円（税込）
  mosaic-CLAS搭載の評価キット．USB I/F，シリアル通信ポート×2（ケーブル付属），TFカード（microSDカード互換）のソケットがある．L1，L2，L5，L6に対応するGNSSアンテナAH-4236（中国Hi-Target）とSMA延長ケーブルが付属

- **評価キット（アンテナなし）**
  価格：89,100円（税込）



- **組み込み向けボード（アンテナなし）**
  価格：93,500円（税込）
  mosaic-CLAS搭載のRaspberry Pi向けの拡張基板（HAT基板）．USB接続でパソコンと組み合わせての利用も可能．アンテナは付属しないので，L1，L2のほかL6受信に対応したGNSSアンテナが別途必要

mosaic-CLAS, mosaic-X5, mosaic-H, mosaic-G5, ZED-F9Pなど，
さまざまな受信機で利用できる小型の全周波アンテナ



- **GNSS全周波**
  パッチ・アンテナ
  YOZ-52728（ヨコオ）
  価格：16,500円（税込）

マグネット内蔵で車のボディにくっつきます．ケーブルは3m



- **GNSS**
  全周波
  ヘリックス・アンテナ
  AH-4236
  （Hi-Target）
  価格：16,500円（税込）

50gと軽量．
3mのSMA延長ケーブルが付属します

トラ技RTKスタータ・キットおよび解説書

- **2周波対応 高速測位タイプ**
  価格：49,500円（税込）
  ZED-F9P（ユーブロックス）搭載．L1，L2，E1，E5b，B1I，B2I，G1，G2対応，GPS/GLONASS/Galileo/QZSS/Beidouの同時受信に対応

- **1周波移動局用【TGRTK-B】**
  価格：22,000円（税込）
  NEO-M8P-0（ユーブロックス）搭載．L1，E1，B1I，G1の1周波対応のRTK測位の入門キット．入門向けのGPS/Beidou対応アンテナ付き

- **2周波RTKの定番ZED-F9P，**
  3周波RTKやCLASに対応する
  mosaicモジュールの解説書
  トランジスタ技術編集部 編

  B5判 224ページ
  定価：3,300円（税込）
  JAN9784789847971
  2024年5月15日 発行



企業とエンジニアをつなぐ!

ECN 求人情報

Engineering Company Networks

— ECN求人では，設計・開発技術者と企業の橋渡しをします．
— スタートアップ企業の事業拡大・協業も積極的に支援します．
— 技術助っ人，副業情報も掲載します．

https://ecn.cqpub.co.jp/recruit/

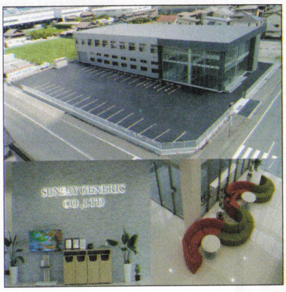
2025
12

トランジスタ技術1月号 掲載
Interface 2月号 掲載

当社は半導体製造用プラズマ電源メーカーです!

高周波並びに電気回路，ソフト，機械設計者

サンセイジェネリック(株)



半導体製造装置向けプラズマ電源および整合器の高周波設計，アナログ，CPU，FPGAデジタル回路設計，機械設計，ソフト開発，修理技術者を募集しています。

【職務概要】
半導体製造装置向けプラズマ電源および整合器の開発，設計，試作，評価などをお任せします。
詳細はＨＰまたは弊社までお問い合わせください。

- support@sunsay.co.jp
- https://www.sunsay.co.jp/

開発現場を支える自社製品があります!

開発エンジニア(ソフト・ハード)

株式会社DTSインサイト



ファブレスメーカーとして、組込みメーカー向けに自社製品を提供している当社にてソフトウェア・ハードウェア開発エンジニアを募集しています。

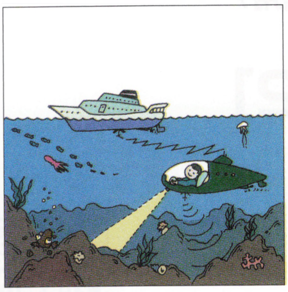
【業務内容】
- マイコン制御ソフトウェアの設計開発
- Linux、Embedded Windows等のドライバ設計開発
- 組込み用ミドルウェアの設計開発
- デジタル回路設計

- TEL 03-6756-9400
- FAX 03-6756-9401
- jinji@dts-insight.co.jp
- https://www.dts-insight.co.jp/

海洋開発で社会基盤の発展に貢献します

設計職(電子回路/FPGA/構造)

アセック(株)



音響情報処理装置（ソーナー/海中通信）の技術・製品開発を行っており、見えない海中を可視化する先端重要技術で、「社会インフラの高度化」に携わる、創業40年の歴史がある企業です。主たる得意先様は、大手プライム企業様です。将来の社会を支える製品開発、先端技術のエンジニアを一緒に目指しましょう！

- TEL 042-336-1481
- FAX 042-336-1550
- info@asec-f.co.jp
- http://www.asec-f.co.jp

電子計測機器業界で共に急成長しよう!

電子計測機器専門技術職

T&Mコーポレーション(株)



技術知識を活かすチャンス！技術職採用募集中。
製品の技術サポート、資料作成、修理、営業サポートなど、多彩な業務を担当。
自由な風土で、裁量権を持ちつつ電子計測機器関連の業務に挑戦しましょう。
一緒に成長しませんか？

- TEL 03-6284-4428
- FAX 03-6284-4483
- info@tm-co.co.jp
- https://tm-co.co.jp/

ロボット・組み込み製品開発募集

回路・ソフト・ハード技術者

(株)三和



農業ロボットや応用物理学実験装置など産学官連携事業で生み出された、新しい時代のニーズにマッチする製品を開発しています。これらを世に送り出す設計開発者・技術者を募集します。

【職務内容】

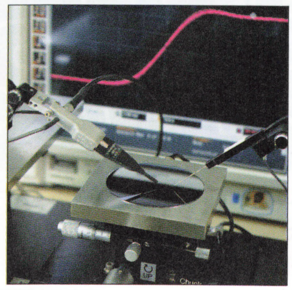
①組み込みソフト開発、②試作、③評価、④回路設計、⑤PCBアートワーク設計、⑥画像処理など

- TEL 048-567-3030
- FAX 048-567-3031
- ziniz@kk-sanwa.jp
- https://kk-sanwa.jp/

メカトロニクスを極める!

製品の設計・開発技者募集

エヌピイエス(株)



主に電気技術的な仕事です。測定器や駆動装置の開発設計にも携わっていただきたいので、アナログ回路が分かる方歓迎です。

また、大手電機メーカー、大学、研究機関等のお客様との技術的な対応、自社取いの半導体検査機器に関わる専門的な対応です。

- TEL 03-3684-2548
- sales@nps-i.co.jp
- https://www.nps-i.co.jp

京都でものづくりしませんか?

アナログ・デジタル回路設計者

アイエイチ(株)



主に電子計測機器を開発・設計・製造しています。勤務地は京都市内です。

製品仕様の検討から関わることができます。自分の能力を最大限に発揮できる環境です。

【仕事内容】

＊アナログ・デジタル回路設計

＊ソフトウェア設計(組込ソフト・HDL等)

＊試作、評価

回路設計経験者歓迎します!

- TEL 075-693-1152
- FAX 075-693-1153
- hrd@aih.co.jp
- https://aih.co.jp/

エンジニア向け技術コンテンツを作る

「Interface」編集者募集

CQ出版(株)

Interface

「Interface」をはじめとする技術コンテンツ作りの仲間を募集。エンジニアや技術好きの方に提供する技術コンテンツを作る仕事です。面白い技術との出会いや,一流エンジニアと知り合いになる機会があるなど、非常に刺激的な毎日を送ることができます。読者のみなさんに「面白い!」と思ってもらえることが目標です!編集未経験の方歓迎です!

- TEL 03-5395-2111
- ayari@cqpub.co.jp
- https://www.cqpub.co.jp/

ニッポン「ものづくり」を支える!

「トランジスタ技術」編集者募集

CQ出版(株)

トランジスタ技術

トラ技Jr.

電子回路の重要性が高まる時代に、これからのエレクトロニクス総合誌「トランジスタ技術」を一緒に作ってくれる仲間を募集します。現場で活躍するエンジニアの方々と一緒に雑誌を作る，他にはできないやり甲斐のある仕事です。読者におもしろがってもらえると最高です! 編集未経験の方歓迎です!

- TEL 03-5395-2111
- ayari@cqpub.co.jp
- https://toragi.cqpub.co.jp/

CQ出版発行の月刊誌に広告を掲載しませんか?

- トランジスタ技術(毎月10日発売)
- Interface(毎月25日発売)
- CQ ham radio(毎月19日発売)

お問い合わせ先

TEL 03-5395-2132

ad_info@cqpub.co.jp

ほしい技術&製品が見つかる!

ECN Products

Engineering Company Networks

― ECNは，日本の電子産業を支える中小企業の製品を紹介するコーナーです．
― スタートアップ企業の事業拡大・協業も積極的に支援していきます．
― 製品の追加情報やお得情報をECN Webサイトに掲載しています．

https://ecn.cqpub.co.jp/

2025 12

トランジスタ技術 1月号 掲載
Interface 2月号 掲載

リチウムイオン電池と充電器の設計，製造

1セルリチウムイオン電池 PJ21

(有)オーディーエス



1セルリチウムイオン電池PJ21をお試しください
* ＊保護回路付きの電池パック（組電池）です
* ＊電池セル：Panasonic UF554350ZP
* ＊PSE取得済
* ＊CE，KCについてはご相談ください
* ＊その他，残量計付き充電回路の設計等も行っております。

●TEL 048-593-6278
●https://www.ods-web.co.jp/
●https://www.ods-web.co.jp/products/pj21

リチウムイオン電池と充電器の設計，製造

Proch-CB100ET-3300GA

(有)オーディーエス



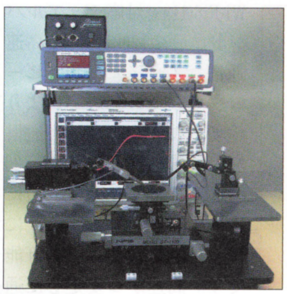
1セルリチウムイオン電池Proch-CB100ET-3300GA 3.7V/2500mAhの従来品からリニューアルしました。
* ＊3.6V/3205mAh
* ＊電池セル：Panasonic NCR18650GA
* ＊コネクタ JST SHR-03A-S-B
* ＊最大放電電流 1A
* ＊その他詳細はウェブサイトをご覧ください

●TEL 048-593-6278
●https://www.ods-web.co.jp/
●https://www.ods-web.co.jp/products/proch-cb100et-3300ga

半導体の原点を探るプロ用計測ツール!

高性能プローブ!

エヌピイエス(株)



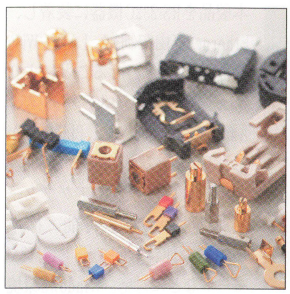
半導体分野で求められる電気特性検査として素材の抵抗率やI.C電圧測定があり、これらはプローブの負荷要素が測定精度に大きく影響を及ぼします。NPSは、高精度測定のための4探針プローブ、FETプローブ（0.02pF）、また、マイクロ波回路用低損失プローブ（<0.5db@40GHz）等の高性能プローブを取扱っております。

●TEL 03-3684-2548
●sales@nps-i.co.jp
●www.nps-i.co.jp

小ロット対応、基板用端子もフレキシブルに。

基板用端子

(株)廣杉計器



株式会社廣杉計器の基板用端子は、ネジ端子・チェック端子・ラグ端子・ジャンパーなど多様な形状・仕様を取り揃え、電子機器・制御装置・計測機器など、幅広い基板設計に対応可能です。最短当日出荷に対応し、開発スピードを損なわず調達をサポート。小ロット注文にも柔軟に対応しております。製品仕様や用途のご相談もお気軽にお問い合わせください。

●TEL 044-855-1320
●FAX 044-854-7364
●spacer@hirosugi.co.jp
●https://hirosugi.co.jp/

小型、低消費電力GNSSモジュール評価キット

mosaic-go G5 P3/P3H

開発:セプテントリオ(株)　販売:CQ出版(株)



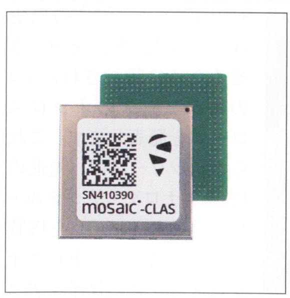
* ・全ての衛星（GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou/QZSS/NavIC）に対応
* ・L1/L2/L5/L6、789チャンネルに対応
* ・2アンテナ対応（P3H）
* ・GNSS生データ（P3）
* ・L6 D/E多チャンネル対応
* ・22.8x16.4x2.4mm/ 2.2g（モジュールのみ）
* ・0.44W(P3)(モジュールのみ)
* ・CE, FCC, RoHS, WEEE, ISED

●TEL 045-287-1067
●sales.jp@septentrio.com
●https://www.septentrio.com/ja

GNSSモジュールmosaic-X5オンライン販売始めました。

mosaic-X5, -H, CLAS　一個から販売

開発:セプテントリオ(株)　販売:(株)ラグレス



* ・「mosaic-x5」モジュール（RTK対応）を搭載
* ・高い更新レート：100Hz、遅延10ミリ秒未満
* ・GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou/QZSS/NavICに対応
* ・L1/L2/L5、448チャンネルに対応
* ・mosaic-H（デュアルアンテナ、方位）、mosaic CLAS（CLAS対応）もございます

●TEL 045-227-0788
●link@luxres.jp
●https://luxres.jp/

LAN経由で4つのPhotoリレーを制御

LAN Photoリレー(4出力)

(有)ヒューマンデータ



LNX-016シリーズは、簡単な制御コマンドによりLAN（有線ネットワーク）経由で、4つのPhotoリレーのON/OFF出力が可能な製品です。自動ON/OFF出力機能やウオッチドッグ監視機能を搭載。PoE対応モデルやワイド電源対応モデルなど、電源供給の仕様に応じて選択できる3型をラインナップしています。

●TEL 072-620-2002
●FAX 072-620-2003
●s2@hdl.co.jp
●https://www.hdl.co.jp/ECN2601

読みやすく見やすいフォント

モトヤ組込みフォント

(株)モトヤ



モトヤフォントは情報伝達の正確さと優れたデザイン性を併せ持ち、組込み分野でも数多くの実績がございます。

- ユニバーサルデザイン対応フォント
- JIS X0213：2004対応フォント
- ビットマップフォント/各種サイズ

導入しやすい売切り永続ライセンスのモトヤフォントを是非ご検討ください。

●TEL 06-6358-9128
●FAX 06-6358-9129
●f-info@motoya.co.jp
●https://www.motoyafont.jp/

RS-232C機器をEthernetで制御

PoE to RS232C変換　RS-ET62

ラトックシステム(株)



本製品をRS-232C機器に装着し、Ethernet経由で制御。LANやWi-Fi機器と組み合わせることによりWindowsPCやiOSデバイス、Android、RaspberryPi、PLCなどからシリアル機器の制御が可能。駆動電源はPoEとACアダプター（別売）から選択可能。標準モードの他、対向モード、M2Mモードなどに対応。Windows環境では接続機器がCOMポートとして認識される専用アプリケーション【RATOC-VSP】を提供。

●TEL 06-7670-5058
●https://www.ratocsystems.com/products/rs232c/wireless/et62/

現場での「つながらない」を解決。

産業用無線LANアダプタ DAP-P3W6

ダイヤトレンド(株)



Wi-Fi6(11ax)対応デュアルバンド。最高1200Mbpsの高速通信。メッシュWi-Fiとビームフォーミング対応により途切れにくく安定した通信を実現します。動作温度-20～60℃、IP67の保護構造により耐候性/防塵防水性に優れ、屋外への設置も可能です。高速かつ安定した通信で、産業現場のIoT化を力強くサポートします。

●TEL 06-7777-9999
●FAX 06-7777-9992
●contact@diatrend.com
●https://www.diatrend.com

12-bit for Every Bench

SIGLENT 12BITオシロスコープを新発売!

シグレントジャパン(株)



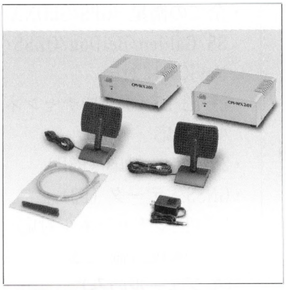
SIGLENTは、信号の忠実度、可視化、解析を向上させるために設計された3つの新シリーズのオシロスコープを発表します。これらの新シリーズは、先進の12-bitアナログ・デジタル・コンバータ（ADC）を搭載し、信号品質を追求したオシロスコープのラインアップを完成させます。

●TEL 03−6284−4428
●FAX 03−6284−4429
●https://tm-co.co.jp

ワイヤレスオーディオリピータ

CPI-WX201

(株)シーピーアイテクノロジーズ



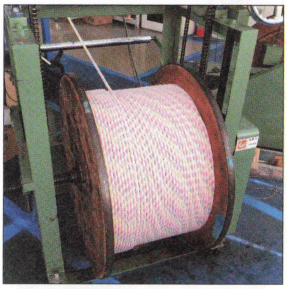
CPI-WX201は、弊社CPI-WXシリーズ専用の無線中継装置です。壁など、電波の通じにくいところに対して無線音声データをケーブルを介して、障害物を避けて目的の場所へ無線音声データを送るという装置です。これによって、通常は電波の届かない別室などへ無線音声データを送ることが可能となります。

●TEL 045-331-9201
●FAX 045-331-9203
●sales@cpi-tec.com
●https://cpi-tec.jp/index.html

柔軟なケーブル・特殊な仕様のケーブルがほしいときに

オーダーメイド ケーブルの設計・製造

モガミ電線(株)



柔軟な電線がほしい、入手困難な仕様になりそう、用途に適した電線がない…
そんなときは、モガミ電線にご相談ください。

- 長年のケーブル設計・製造のノウハウ
- 信頼できる品質管理体制
- 開発に適した一貫製造体制

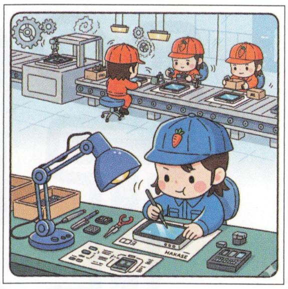
で対応いたします。

- TEL 0263-52-0131
- FAX 0263-52-6565
- sales@mogami-wire.co.jp
- https://www.mogami-wire.co.jp/

試作と量産は得意です!

技術力と対応力で応えます

(株)キャロットシステムズ



創業32年の信頼と実績！私たちは開発会社でありながら、量産の豊富な経験も持つファブレス企業です。自社工場を持たないからこそできる柔軟な対応力で、試作から量産まで最適なプランをご提案。あなたのアイデアを形にし、確かな品質でプロジェクト成功を全力サポート！
まずは気軽にご相談ください！

- TEL 042-750-0007
- FAX 042-750-0005
- system@carrotsys.co.jp
- https://www.carrotsys.co.jp/

産業用GigEシングルボードカメラ

装置組込式コンパクトサイズ

(株)アルゴ



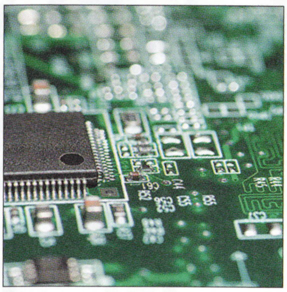
■310万画素IMX900センサ搭載
■半導体検査装置に最適
■36×38×17 mmサイズ
■PoEモデル選択可
■M12・Cマウント
■1Gbpsのデータ帯域
■ケーブル長100m
■OEM供給可
■デバイス制御SDK無償付属
■豊富なサンプルプログラム

- TEL 06-6151-9283
- argo@argocorp.com
- https://www.argocorp.com/

1-Click見積で即時見積納期回答

プリント基板のネット通販 P板.com

(株)ピーバンドットコム



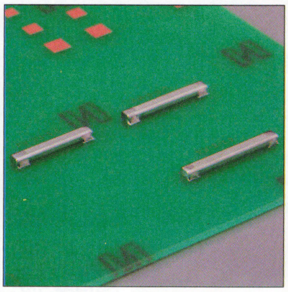
基板の設計から製造・実装・部品調達まで、P板.comなら一括で対応可能です。1-Click見積による迅速な見積もり、高品質な基板製造に加え、部品調達から実装工程までをオンライン上で完結できます。試作から量産まで幅広く対応し、開発工数とリードタイムの大幅な削減を実現します。

- TEL 03-3261-3431
- FAX 03-3261-3432
- info@p-ban.com
- https://www.p-ban.com/

高電流バー(最大50A)

PWシリーズ

(株)マックエイト



プリント基板の回路パターン補強やジャンパーに使用できる端子。
50Aまでの電流に対応できる。材質は銅、ニッケル下地スズめっき処理。
チップマウンタに対応し自動機での実装が可能。
長さは5.08mmから25.4mmまでの数種類をラインナップしている。

- https://www.mac8.co.jp

CQ出版発行の月刊誌に広告を掲載しませんか？

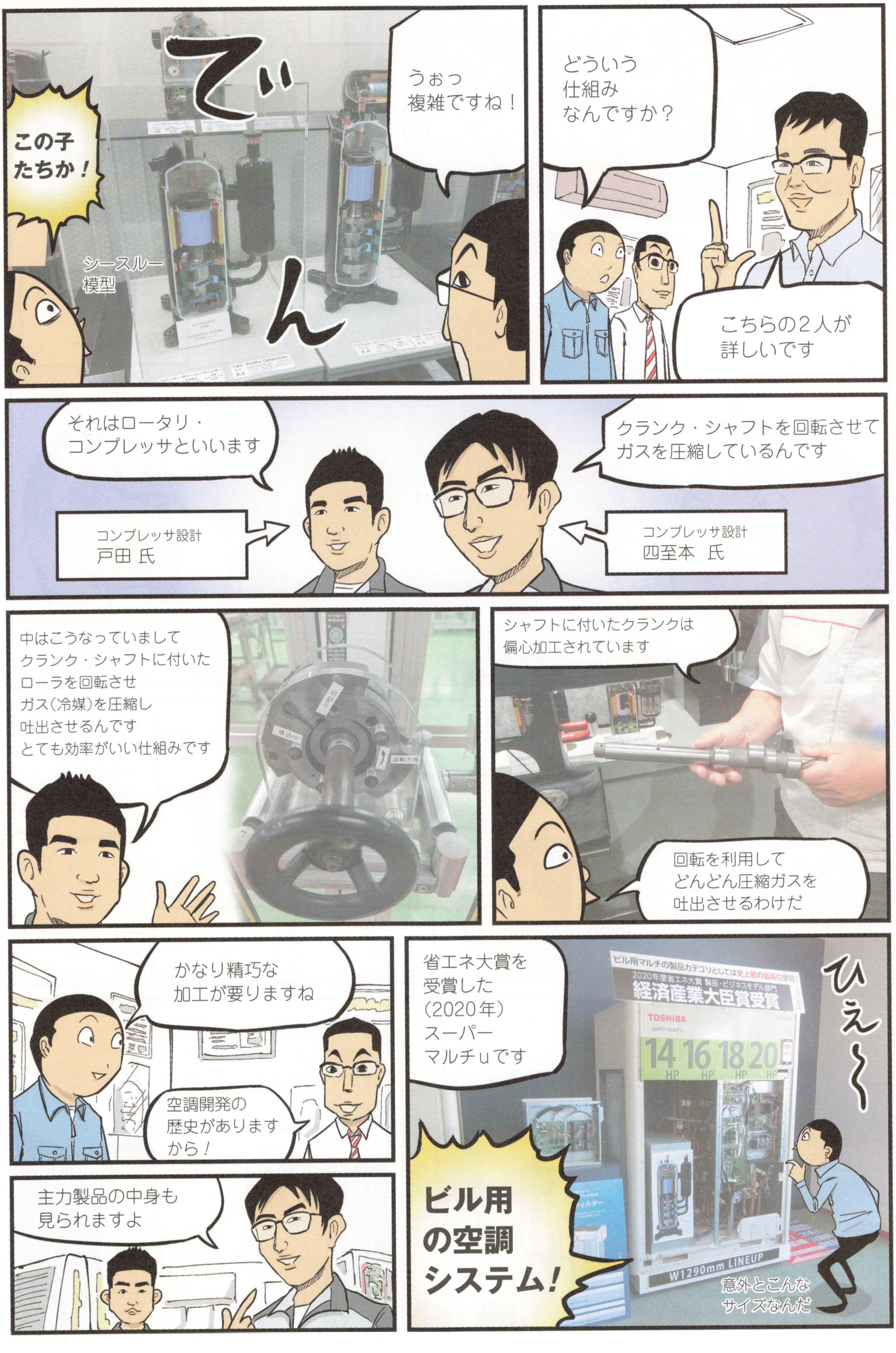
- **トランジスタ技術**(毎月10日発売)
- **Interface**(毎月25日発売)
- **CQ ham radio**(毎月19日発売)

お問い合わせ先

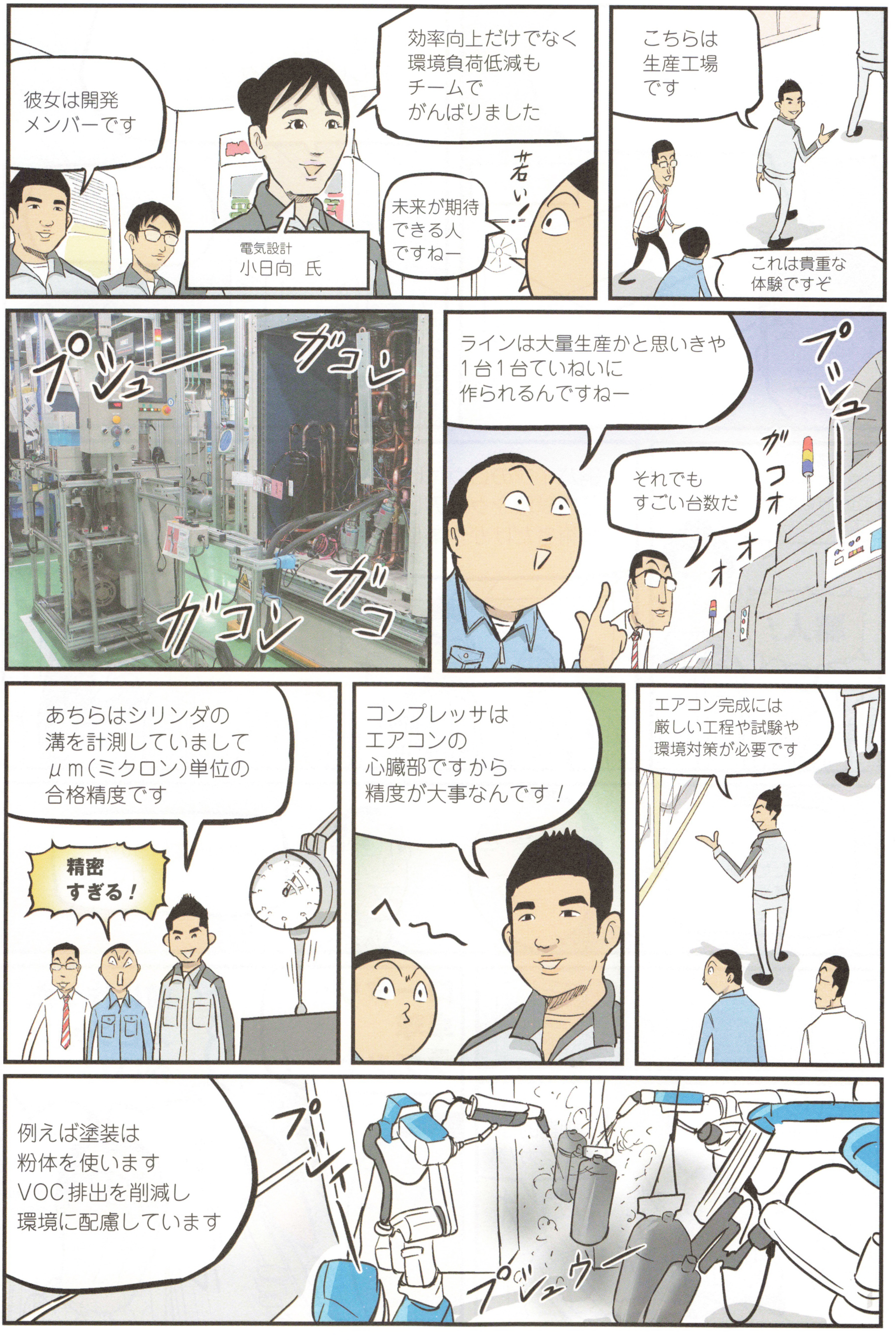
TEL 03-5395-2132
ad_info@cqpub.co.jp

激熱エレキ！僕たちトラ技団

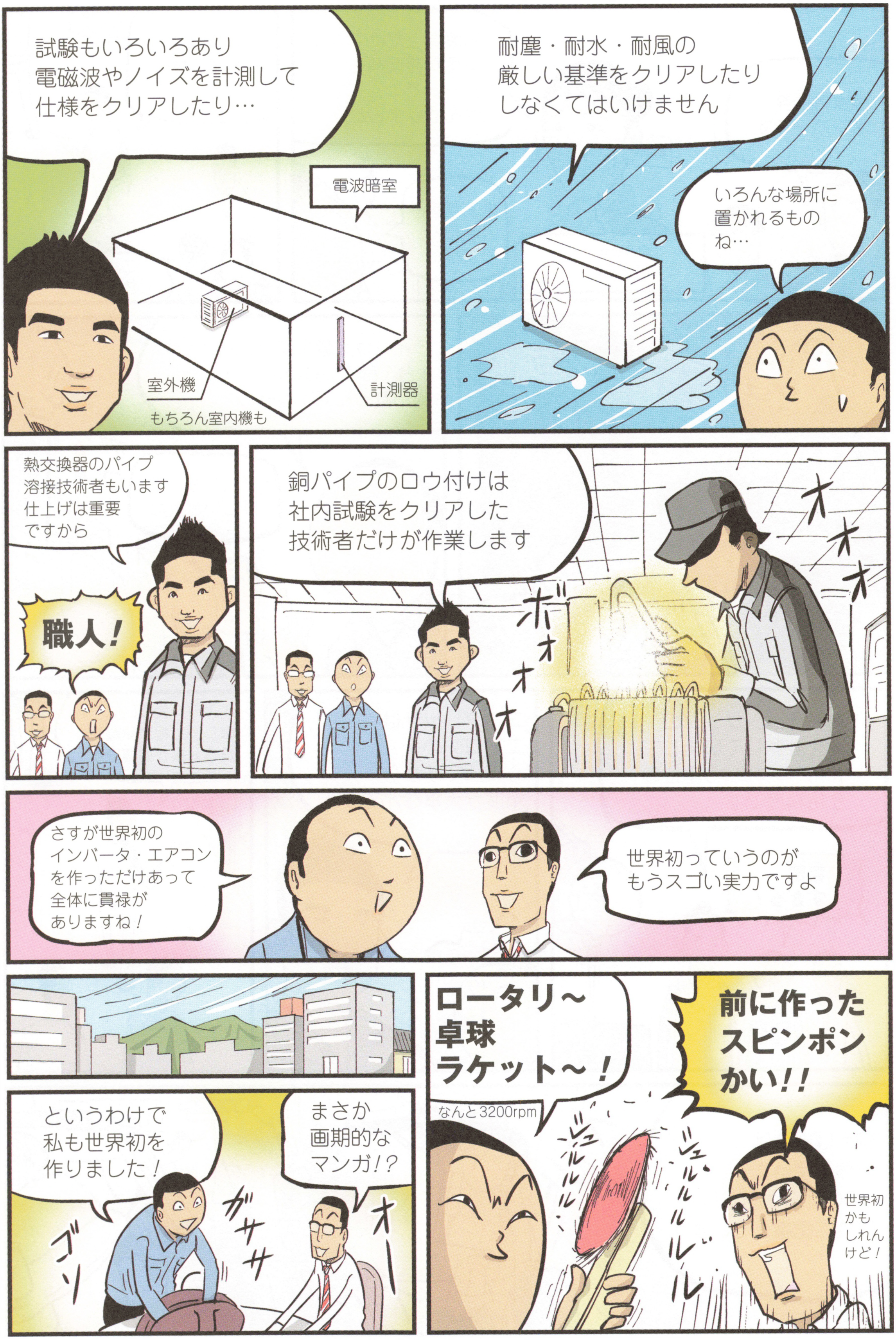




この子たちか！
でん
シースルー模型
うぉっ複雑ですね！
どういう仕組みなんですか？
こちらの2人が詳しいです
それはロータリ・コンプレッサといいます
クランク・シャフトを回転させてガスを圧縮しているんです
コンプレッサ設計
戸田 氏
コンプレッサ設計
四至本 氏
中はこうなっていまして
クランク・シャフトに付いた
ローラを回転させ
ガス(冷媒)を圧縮し
吐出させるんです
とても効率がいい仕組みです
シャフトに付いたクランクは偏心加工されています
回転を利用してどんどん圧縮ガスを吐出させるわけだ
かなり精巧な加工が要りますね
空調開発の歴史がありますから！
主力製品の中身も見られますよ
省エネ大賞を受賞した（2020年）スーパーマルチuです
ビル用の空調システム！
ひぇ～
意外とこんなサイズなんだ
2020年度省エネ大賞 製品・ビジネスモデル部門
経済産業大臣賞受賞
TOSHIBA
14HP 16HP 18HP 20HP
W1290mm LINEUP

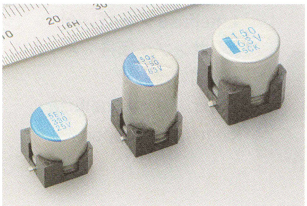


効率向上だけでなく
環境負荷低減も
チームで
がんばりました
彼女は開発
メンバーです
電気設計
小日向 氏
若い！
未来が期待
できる人
ですねー
こちらは
生産工場
です
これは貴重な
体験ですぞ
プシュー
ガコン
ガコン
ガコ
ラインは大量生産かと思いきや
1台1台ていねいに
作られるんですねー
プシュー
ガコオオオ
それでも
すごい台数だ
コンプレッサは
エアコンの
心臓部ですから
精度が大事なんです！
あちらはシリンダの
溝を計測していまして
μm（ミクロン）単位の
合格精度です
精密
すぎる！
エアコン完成には
厳しい工程や試験や
環境対策が必要です
へ～
例えば塗装は
粉体を使います
VOC排出を削減し
環境に配慮しています
プシィ
プシュウー


試験もいろいろあり
電磁波やノイズを計測して
仕様をクリアしたり…
電波暗室
室外機
計測器
もちろん室内機も
耐塵・耐水・耐風の
厳しい基準をクリアしたり
しなくてはいけません
いろんな場所に
置かれるもの
ね…
熱交換器のパイプ
溶接技術者もいます
仕上げは重要
ですから
職人！
銅パイプのロウ付けは
社内試験をクリアした
技術者だけが作業します
ボオオオ
オオオ
さすが世界初の
インバータ・エアコン
を作っただけあって
全体に貫禄が
ありますね！
世界初っていうのが
もうスゴい実力ですよ
というわけで
私も世界初を
作りました！
まさか
画期的な
マンガ!?
ゴソ
ガサササ
オー
ロータリ～
卓球
ラケット～！
なんと3200rpm
前に作った
スピンポン
かい!!
ジュルルル
ジュルルルル
世界初
かも
しれん
けど！

Information ①

1000 μF・25 V で定格リプル電流5700 $\mathrm{mA_{RMS}}$ の電解コンデンサ　HVX(-J)，HTX(-J)シリーズ



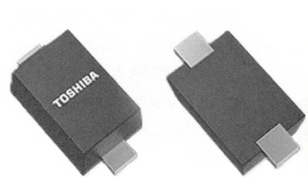
太陽誘電(株)
■ サンプル価格：150円（税別）
☎(03)6757-8330（営業代表）
https://www.yuden.co.jp/jp/contact/

太陽誘電は，定格リプル電流3300 m〜5700 $\mathrm{mA_{RMS}}$(125 ℃時)，2200 m〜4000 $\mathrm{mA_{RMS}}$(135 ℃時)の導電性高分子ハイブリッド・アルミニウム電解コンデンサ・シリーズ36品種を発売した．外形寸法はϕ8×10 mmからϕ12.5×13.5 mmまでの5種．

定格電圧は25〜63 V，静電容量は47 μ〜1000 μF．使用温度範囲は−55〜＋135 ℃，耐久性は4000時間で車載信頼性規格AEC-Q200に対応する．

パワー・ステアリングやADASなどの電源回路に向く．

ダイナミック抵抗0.16 Ωのサージ保護用 5.6〜36 V ツェナー・ダイオード　XCEZシリーズ



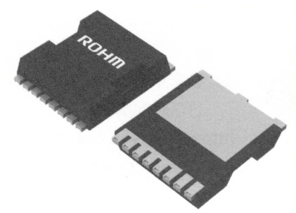
東芝デバイス＆ストレージ(株)
■ 参考価格：15円（税別，DigiKey調べ）
https://toshiba.semicon-storage.com/jp/contact.html

東芝デバイス＆ストレージは，外形寸法が1.6×0.8 mmの5.6〜36 Vツェナー・ダイオード20品種を発売した．従来品から実装面積を59 %削減した．

ダイナミック抵抗は0.16〜2.6 Ωと低く，サージ電圧の吸収性が高いとする．動作抵抗は最大30〜100 Ω，最大許容ツェナー・サージ電力は10 msパルス幅で6 W．静電気耐量は最大±30 kV(いずれも+25 ℃時)．

接合温度の定格値は＋150 ℃．車載機器向け．

オン抵抗13 m〜65 mΩの表面実装タイプ 750 V SiC MOSFET　SCT40xxDLLシリーズ



ローム(株)
■ サンプル価格：5,500円（税別）
https://www.rohm.co.jp/contact-links

ロームは，外形寸法11.68×9.9×2.4 mmで表面実装型リードレス・パッケージ(TOLL)の750 V SiC MOSFETを6品種を発売した．オン抵抗は13 m〜65 mΩで，最大ドレイン電流は26〜120 A (25 ℃時)．許容電力は100〜405 W．ジャンクション温度は最高＋175 ℃．

従来パッケージ品と比較して部品面積は約26 %削減，厚さは約半分．AIサーバなどの薄型電源向や太陽光発電インバータ，電力貯蔵システムなどに向く．

GaN向け±200 V/nsハーフブリッジ・ゲート・ドライバ　STDRIVEG210，STDRIVEG211

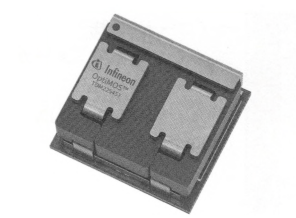


STマイクロエレクトロニクス(株)
■ 参考単価：約1.22US$（1000個購入時）
https://www.st.com/content/st_com/ja/contact-us.html

STマイクロエレクトロニクスは，GaN向けハーフブリッジ・ゲート・ドライバを2品種発売した．最大定格レール電圧は220 V．内蔵のリニア・レギュレータでハイ/ロー・サイドに6 Vゲート信号を生成する．

ソース電流は最大1 A，シンク電流は最大2.4 A．起動時間は300 nsで断続動作のウェイクアップ時間の短縮に向く．±200 V/nsのdV/dt耐性をもち，低電圧誤動作防止や過熱保護などの機能を内蔵する．パッケージは5×4 mmの18ピンQFN．

データ・センタ向け出力140 Aのトランス搭載電圧レギュレータ　TDM22545T



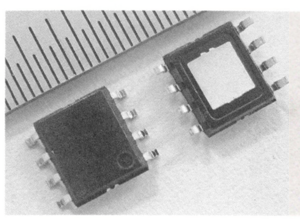
インフィニオン テクノロジーズ ジャパン(株)
https://www.infineon.com/ja/contact-us

インフィニオン テクノロジーズは，出力電流が140 Aのトランス搭載電圧レギュレータを発売した．入力電圧は4.25〜16 V，出力電圧は0.225〜2 V．従来の電源よりも過渡応答が高速とする．

出力は2相で，各相の出力は最高80 A(DC)/120 A(ピーク)．スイッチング周波数は600 k〜1.2 MHz．IC温度レポート機能や各種保護機能入り．

電源電圧は4.25〜5.5 V．動作温度範囲は−40〜＋125 ℃．パッケージは10×9×4.8 mmのLGA．CPU/GPUなどの電源に向く．

入力4.5〜60 Vで出力2.5〜18 V・1 Aの小型降圧型DC-DCコンバータIC　XC9711



トレックス・セミコンダクター(株)
■ サンプル価格：メーカに問い合わせ
https://www.torex.co.jp/contact-us

トレックス・セミコンダクターは，入力電圧4.5〜60 V，出力電圧2.5〜18 V，出力電流1 AのDC-DCコンバータICを発売する．

PWM制御とPWM/PFM制御を選択できる．ソフト・スタートの外調やパワー・グッド機能，低電圧誤動作防止，各種保護回路を搭載する．消費電流は9 μA．スイッチング周波数は800 kHz．

動作温度範囲は−40〜＋125 ℃．外形寸法は3×3×0.75 mmのDFNまたは6.2×5.2×1.7 mmのSOP．

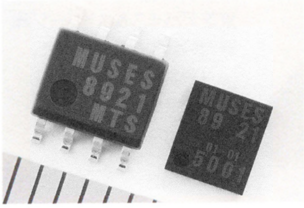
24 Vバッテリ・システムや産機用センサなどに向く．



製品情報をお待ちしています！
✉trinfo@cqpub.co.jp

Information②

ひずみ率0.0004 %の2回路入り JFET入力OPアンプ　MUSES8921



日清紡マイクロデバイス(株)
- 参考単価：550円(1000個購入時，税込み)

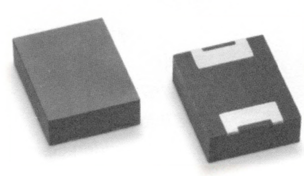
https://www.nisshinbo-microdevices.co.jp/ja/contact/

日清紡マイクロデバイスは，ひずみ率0.0004 %のJFET入力OPアンプを発売した(1 kHz，10倍，V_{out}＝5 V_{RMS}，R_L＝2 kΩ時)．2回路入り．オーディオ向け．

入力バイアス電流は5 pA．入力換算雑音電圧は8 nV/$\sqrt{Hz}$(1 kHz時)．スルー・レートは25 V/μs(1倍，V_{in}＝2 V_{P-P}，R_L＝2 kΩ，C_L＝10 pF時)．ゲイン帯域幅積は11 MHz．

電源電圧は±3.5～±17 V．動作温度範囲は－40～＋125 ℃．パッケージはSOPまたはDFN．

パルス電流3 kAのTVSダイオード　DFNAK3シリーズ



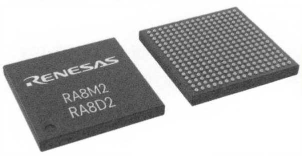
Littelfuseジャパン(合)
- サンプル価格：メーカに問い合わせ

https://www.littelfuse.com/ja-jp/support

リテルヒューズは，3 kA(インパルス電流波形8/20 μs時)のサージ電流定格を備えたTVSダイオードを発売した．パッケージは10×8×3 mmのDFNで，従来品に比べて基板面積を70 %，高さを70 %削減する．

スタンドオフ電圧は58～80 V，最大クランプ電圧は100～130 Vで，IEC 61000-4-5レベル4に準拠する．最小ブレークダウン電圧は64～89 V，最大ブレークダウン電圧は70～100 V．動作温度範囲は－55～＋125 ℃．

1 MバイトのMRAM搭載！ 1 GHz動作のCortex-M85マイコン　RA8M2，RA8D2



ルネサス エレクトロニクス(株)
- 参考単価：US$19.75(1個購入時)

https://www.renesas.com/ja/contact-us

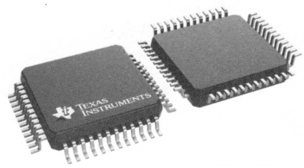
ルネサス エレクトロニクスは，最大1 MバイトのMRAMを搭載する32ビット・マイコンを発売した．CPUコアは1 GHz動作のCortex-M85と250 MHzのCortex-M33．22 nmプロセス採用．

SRAMは2 Mバイト．インターフェースはギガ・ビットEthernet×2とTSNスイッチ，USB 2.0，CAN FDなど．

RA8D2は最大1280×800解像度に対応するLCDコントローラと2Dグラフィックス・エンジンを備える．

パッケージは176ピンQFPまたは224/289/303ピンBGA．

低価格0.49ドルでFPU，PGA搭載！ 160 MHz動作のリアルタイム制御向けマイコン　F28E120SC，F28E120SB



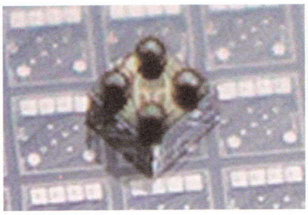
テキサス・インスツルメンツ(合)
- 参考単価：US$0.49(1000個購入時)

https://www.ti.com/ja-jp/info/contact-us.html

テキサス・インスツルメンツは0.49ドルのリアルタイム制御向けマイコンを計2種を発売した．

CPUは最高160 MHz動作でDSP機能をもつ32ビットC28x．FPUも搭載する．フラッシュ・メモリは最大128 Kバイトで RAMは16 Kバイト．インターフェースはI^2C，UART，SPI，SCI．12ビットA-Dコンバータ，PGA，モータ電源用のMCPWM，PWMなどを搭載する．電源電圧は3.3 V．動作温度は－40～＋125 ℃．パッケージは9 mm角のQFPと5 mm角QFN．

なんと0.46 mm角でパッケージ内蔵も可！ 32MHzシリコンMEMS振動子　SiT11100



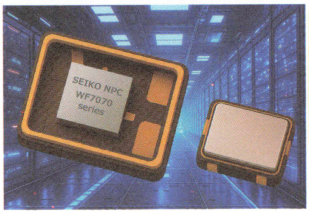
SiTime Japan(合)

https://www.sitime.com/ja-jp/contact-us

サイタイムは，同社としては初となるシリコンMEMS振動子を発売した．周波数は32 MHz．外形寸法が0.46 mm角と超小型で他のチップのパッケージに内蔵することも可．パッケージはBGAまたはベア・チップ．周波数許容誤差は±10 ppm(いずれも25 ℃時)．BluetoothやIEEE 802.15.4の無線SoCなどに向く．

外部負荷容量は2 p～8 pF．包括的周波数許容差は－30～＋85 ℃で±25 ppm以下，－40～＋125 ℃で±40 ppm．

5G向け±10 ppmの100 M～500 MHz差動出力の水晶発振器用IC　7070シリーズ



セイコーNPC(株)
- サンプル価格：メーカに問い合わせ

https://www.npc.co.jp/contact/

セイコーNPCは，発振周波数100 M～500 MHz(基本波形)で外形寸法2×1.6 mmの差動出力発振器用ICを発売した．温度補償精度は±10 ppm(－40～＋105 ℃)．出力形式はLVPECLとLVDS．

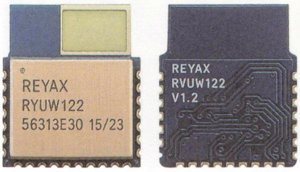
内蔵メモリ(OTP)と温度補償回路により水晶振動子の周波数温度特性を補償する．

動作電圧は2.5～3.3 V(LVPECL)，1.8～3.3 V(LVDS)．消費電流は12 mA_{typ}(156 MHz，1.8 V，LVDS 時)．動作温度範囲は－40～＋125 ℃．データ・センタや光トランシーバなどに向く．

製品情報をお待ちしています！
trinfo@cqpub.co.jp

Information ③

10 cm精度の位置測定用UWBモジュール　RYUW122



REYAX Technology(M2Mクラフト扱い)
■ 参考価格：3,200円(税別)
https://www.m2mcraft.co.jp/company.html#contact

REYAX Technologyは位置精度が10 cmのUWB測位モジュールを発売した．データ・レートは850 kbps，6.8 Mbps．アンテナ内蔵で工事設計認証済み．インターフェースはUARTで制御はATコマンドによる．アンカ/タグ・モードをサポート．

周波数レンジは6489.6 MHzと7987.2 MHz．IEEE 802.15.4-2015 UWBとIEEE 802.15.4z(BPRFモード)をサポートする．電源電圧は2.4～3.6 V．動作温度は－40～＋85 ℃．外形寸法は16.7×13×2.2 mでピッチは2.54 mm．

250 GHzで－7 dB！ 0.5 mmコネクタ搭載同軸ケーブル　MWX0A5



㈱潤工社
https://market.junkosha.com/jp/contact

潤工社は，0.5 mmコネクタを搭載したDC(直流)～250 GHz同軸ケーブル・アセンブリを発売する．アダプタは0.5 mm～1 mm．

挿入損失は250 GHzで約－7 dB．

誘電体層にはフッ素樹脂のPTFEテープを採用．

コネクタには再現性の高い接続を得られる機構(セーフティ・ロック・コネクタ)を備える．

まだ標準化されていない0.5 mmインターフェースに備える．ミリ波・サブテラヘルツ波領域の精密評価・測定に向く．

ドロッパ方式で4チャネル独立の32 V・3 A，5 V・5 A直流安定化電源　GPE-2323A，GPE-3323A，GPE-4323A



㈱テクシオ・テクノロジー
■ 参考価格：78,000円(税別)～
https://www.texio.co.jp/products-support/contact_f/

テクシオ・テクノロジーは，ドロッパ方式の2～4チャネル直流安定化電源を発売した．

出力は機能やチャネルで異なり，32 V・3 A，5 V固定・5 A，5 V・1 A，15 V・1 Aなど．各チャネルは独立した絶縁出力なので極性を問わずに使える．読み取り分解能は10 mV/1 mA．外部設定ON/OFFコントロールや，設定値をロックする機能などを搭載する．入力電圧はAC100 V/120 V/220 V/230 V．外形寸法は210×155×306 mm．最大消費電力は420 W/550 VA．

散発的イベント検出強化！ 更新レート450万波形/sの帯域幅1 GHzオシロスコープ　MXO 3シリーズ



ローデ・シュワルツ・ジャパン㈱
■ 参考価格：(税別) 2,363,000円～(8チャネル)，1,012,000円～(4チャネル)
https://www.rohde-schwarz.com/jp/_63733.html

ローデ・シュワルツは，4/8チャネルのオシロスコープを発売した．波形更新レートは4.5 M波形/s，FFT演算は5万回/sで，散発的イベントの検出を強化した．帯域幅は100 M～1 GHz，標準で12ビット分解能，フル・サンプリング・レートで動作するモードでは最大18ビット．オフセット範囲±3 V，最小垂直分解能1 mV/divを備え，ノイズ低減と高精度測定を両立する．

11.6インチのタッチ・スクリーン付きで重量は約4 kg．5Uサイズ．VESAマウントに対応する．

6 GHz帯対応の産業向けWi-Fi-有線LANブリッジ　BR-600AX



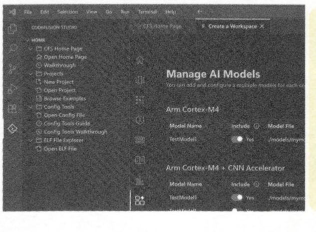
サイレックス・テクノロジー㈱
■ 参考価格：77,592円(ISダイレクト調べ)
https://www.silex.jp/contact/contact-input

サイレックス・テクノロジーは，Wi-Fi 6Eの6 GHz帯にも対応する産業向けWi-Fiブリッジを発売した．有線LAN(100Base-TX/1000Base-T)ポートをもつ機器を無線LAN(IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax)に接続する．

個々の機器に同ブリッジを接続して個別のIPアドレスとMACアドレスを使う動作と，同製品のMACアドレスを使い最大16台まで接続し，接続した機器のIPアドレスのみを使う動作が可能．

動作温度範囲は－20～＋55 ℃．外形寸法は130×80×37 mm．

AI開発を統合できるエッジ機器向けマイコン開発環境　CodeFusion Studio 2.0



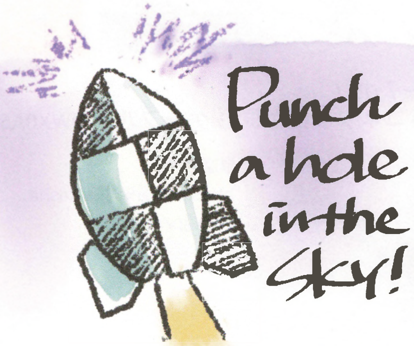
アナログ・デバイセズ㈱
■ ダウンロード：
https://developer.analog.com/solutions/codefusionstudio
https://www.analog.com/jp/support.html

アナログ・デバイセズは，同社のマイコンの統合開発環境をエッジ機器向けに更新した．断片的なAIワークフローを1つのプロセスに統合できる．AIモデルはオープン・ソースのTensorFlowやPyTorchからインポート可能．AI/機械学習処理の負荷の最適化にはZephelin AI Profilerを使用．

ベースはVisual Studio Codeのオープン・ソース．異種コアを搭載したデバイスも同一の環境で開発可能．入手は同社Webページからのダウンロード．



製品情報をお待ちしています！
✉trinfo@cqpub.co.jp



エンジニアのための宇宙開発ウォッチ

第49回　海からロケットを打ち上げる…マジメに考えてみる

thgrace

海からロケットを打ち上げる

● ロケットの打ち上げは周辺国に気を遣う

現在，軌道上に衛星を打ち上げるために多段式のロケットが必要です．軌道までの途中でドンガラを捨てる，つまり地上に使い終わったタンクやらエンジンが降ってくることになります．日本は大海に面していて国境が遠いのでよいのですが，内陸国とか国境が近い場合は工夫が必要です．イスラエルは西向きにしか打ち上げられないし，アメリカ(米国)はキューバが，インドはスリランカが，中国は台湾やフィリピンやインドネシアが近くにあり制限が多いのです．利便性を考えると，海上からロケットを打ち上げれば……というアイデアは昔からあります．

● 実用化された海上打ち上げシステムあり

実は1990年代から2010年代まで，海上からの打ち上げに特化した企業Sea Launchがありました．アメリカ-ロシア-ウクライナの合弁企業でした．システムの概要を図1に示します．

ロケットはウクライナのZenit-3SLを，射点Odysseyは日本製の中古掘削リグを改造したものを，ロケット輸送と打ち上げ管制に中古フェリーを用意して，アメリカ西海岸ロングビーチを母港として活動しました．

Zenitに限らず旧ソビエト連邦系のロケットは横置き組み立て横置き整備ができるのと，Zenitは射点周

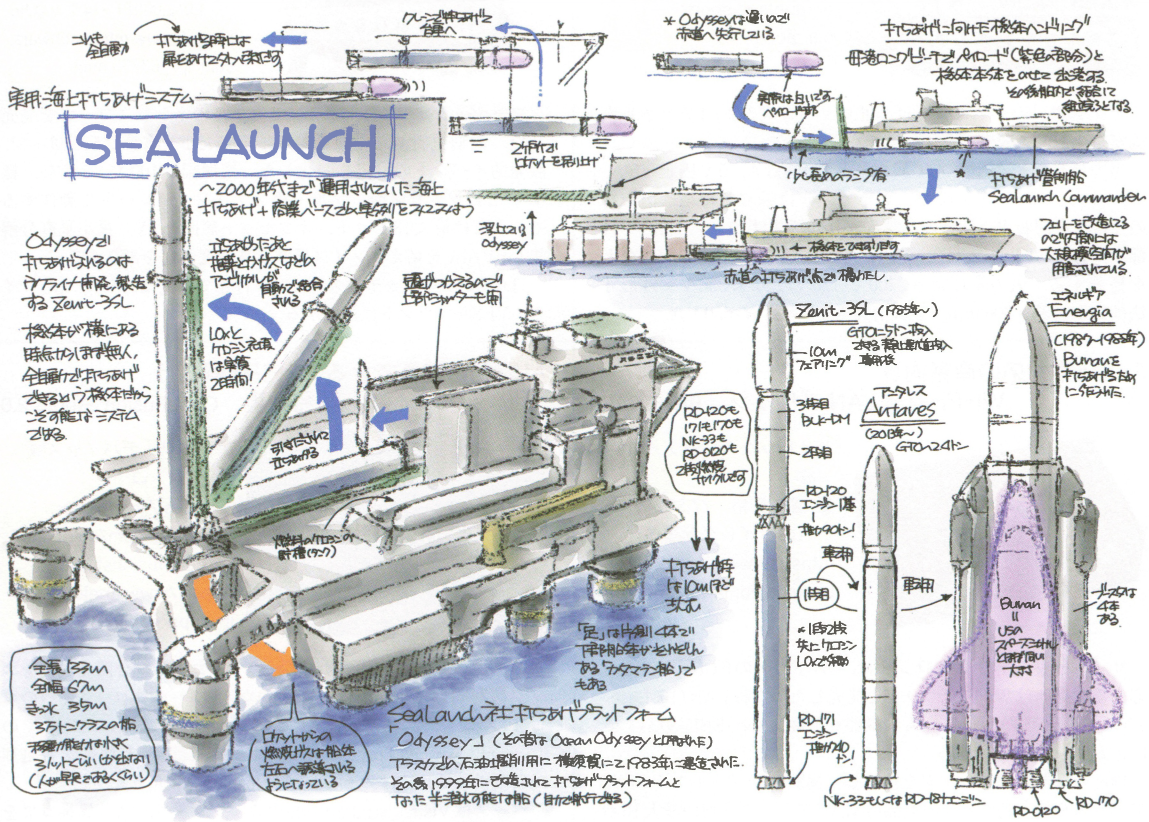


図1　海からロケットを打ち上げる…事前準備と自動化が求められる
Sea Launch社(アメリカ-ロシア-ウクライナ合弁)の実際のシステム

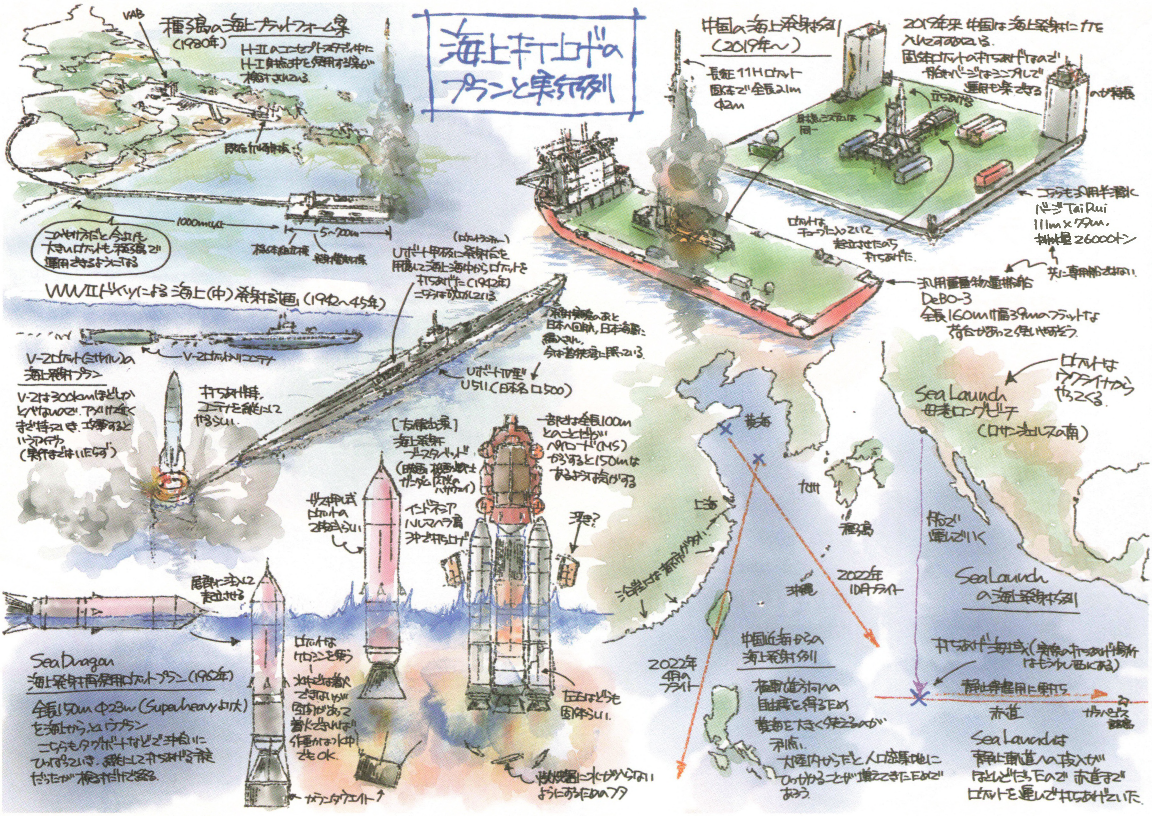


図2　中国が活用している海上打ち上げ…日本も試してみてもいいのかもしれない
世界の海上打ち上げの今と昔

り作業も自動化されていて海上打ち上げにうまく適合できたようです．約15年の運用で打ち上げ36回(失敗4回)を記録していますが，2014年のロシアによるウクライナ侵攻でZenitの供給が止まってしまいました．

海上ロケット発射の実際

● 古すぎる歴史①…なんとアメリカの独立戦争でも？

海上からのロケットやミサイルの打ち上げには，長い歴史があります．**図2**には示していませんが，黒色火薬が発明されて以降，なんと11〜14世紀にも記録があります．特に知られているのはアメリカ独立戦争です．アメリカ国歌の1番の歌詞に，ロケットの赤い炎についてうたわれているのは有名です．

● 古すぎる歴史②…なんとドイツの潜水艦Uボートでも？

近代的なロケットでは，1942年のドイツの試みが知られています．Uボートに搭載して海中海上から試し打ちしていますので，今に至る潜水艦搭載ミサイルの始祖となっているのです．第2次世界大戦ではその後艦載ロケットが多数使用されていて，日本でも採用された記録が残っています．

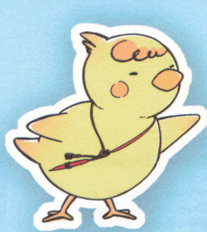
● まぁでもだいたいは企画倒れになりがち

ドイツはその上を行き，世界初の弾道弾V-2を海上から発射することも考えていました．V-2の射程は300 km程度と短いので，ひそかに近づいて発射することを考えていたようですが，計画だけで終わりました．

1962年アメリカで，月有人探査用Saturn-Vをはるかに上回るサイズのロケットを，半海中から打ち上げることを検討したことがありました．しかし船や海上を使う場合，塩害対策が必要であり莫大なコストがかかります．またサイズもサイズだったのでこちらは企画倒れ．日本でも種子島東岸に海上射点なんていう検討もなされましたが，検討にとどまっています．

● 中国の海上発射の実際

中国はその位置からして打ち上げにいろいろ障害があります．そのためでしょう，2019年ごろから海上発射を試みています．**図2**に少し古いですが，打ち上げイメージと船(はしけ)を記載してみました．液体系ロケットを海上で使用しようとするとどうしても**図1**のように用意周到な準備が必要となりますので，中国では固体ロケットが使われています．これだと船やはしけの上に，射点などの地上資材をポンと乗せるだけですから，黄海を存分に使って極軌道への自由度を高めています．海は広いけど人口密度の高い日本でも，試してみてもいい取り組みかもしれません．



読者プレゼント 2026年1月号

トランジスタ技術誌［読者アンケート］のWebページから
アンケートに回答してお申し込みいただけます．
なお，回答にはCQ connectへの会員登録が必要です．

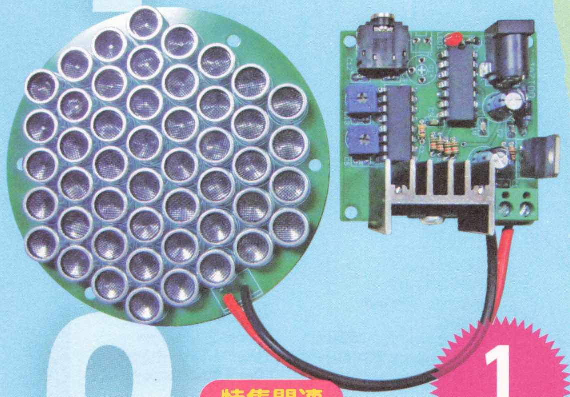
1

特集関連

パラメトリック・スピーカー実験キット（完成品）

1名様

提供：ハムスクエア



2

特集関連

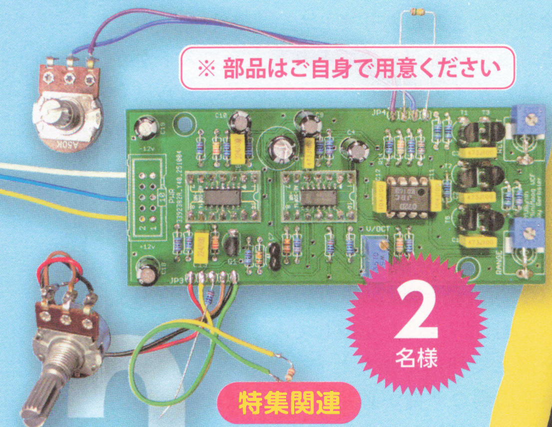
パラメトリック・スピーカー実験キット（組み立てキット）

1名様

提供：ハムスクエア

3

※ 部品はご自身で用意ください



特集関連

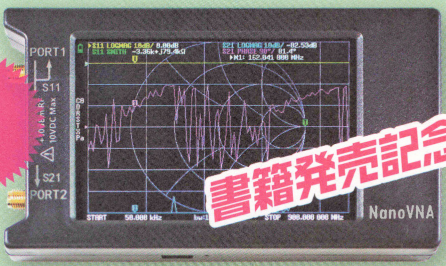
トランジスタをはしご状にしたラダー型VCFの製作 生基板

2名様

提供：安田 仁

4

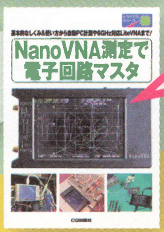
NanoVNA-H4 4インチ表示 1.5GHzネットワーク・アナライザ



1名様

書籍発売記念!!

新刊！ NanoVNA測定で電子回路マスタ



いま，売れています

5



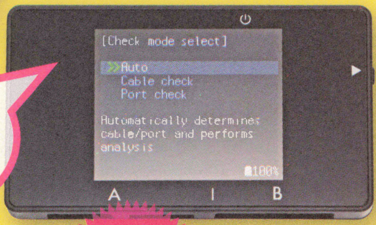
ディジタル・マルチメータ CD5002

1名様

提供：三和電気計器

6

最新型！ USBケーブルチェッカー3



USBポートのチェック機能も付きました！

1名様

提供：ビット・トレード・ワン

7



10個！

1名様

3号継続エンジニア応援！

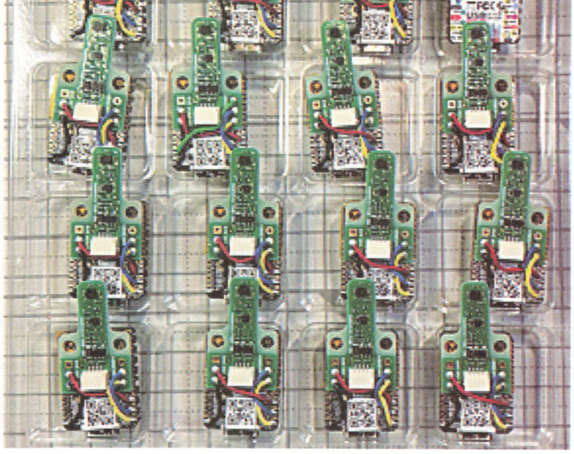
次世代パワエレ！ SiCトレンチMOSFETを10個 SCT3030ALGC11

提供：ローム



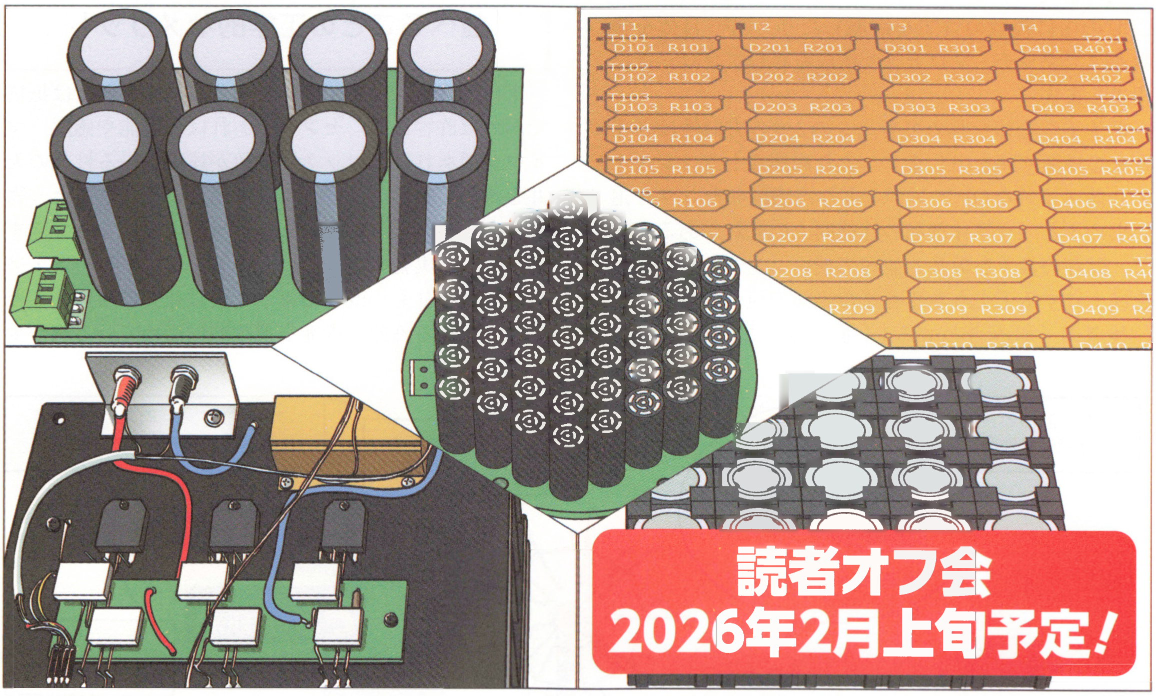
トラ技と協賛企業は，エンジニアのみなさんを応援しています！

特集



小っさい回路で
大っきい効果！

実力けた違い！ 小回路アレイの数理



読者オフ会
2026年2月上旬予定！

イントロダクション1

数理的に実力UPがトレンド！並べる小回路のススメ

宮田 賢一 Kenichi Miyata

「並べる」ことによる性能向上が最近のトレンド

システムの性能を高める方法には，大きく分けて2つの方向性があります．1つは個々の部品そのものを高性能化すること，もう1つは同じ部品を多数並べてトータルとして性能を押し上げることです．CPUを例にとれば，前者は動作周波数を上げて1コアあたりの処理能力を向上させるアプローチ，後者は1つのCPUの中に複数のコアを搭載したり，CPU自体を複数並べてマルチ・プロセッサ構成を組むアプローチに相当します．

電子工学全体を眺めても，この2つの方向性はさまざまな場面で顔を出します．より高速なトランジスタ，より低ノイズなOPアンプ，より高感度なセンサを追い求めるという単体部品の性能向上の流れがある一方で，既存の素子を数多く並べて使い，全体として能力を底上げする工夫もさまざまな場面で現れます．

後者の「組み合わせる」「並べる」という手法は，図1に示すように，見た目こそ単純ですが，実は非常に強力です．光・電気・音・情報処理など，ほとんどすべての分野で，この考え方が性能向上の原動力になってきました．

本特集では，この「並べる」発想がどのように工学的な性能向上をもたらし，その背後にどのような数学的原理がひそんでいるのかを，身近な部品からシステム・レベルまで紹介していきます．

並べることの工学的なメリット

単体の素子には必ず限界があります．たとえば抵抗であれば許容電力，センサであれば分解能や感度，マイコンであればクロック周波数が達成し得る性能の天井を決めてしまいます．これを超えようとすると，物理的な限界に近づいていき，実現が困難になってきます．しかし実務の設計では，素子を単にグレード・アップするよりも，既存の素子を複数並列に用いることで，手に入る性能や機能を飛躍的に高めている例が少

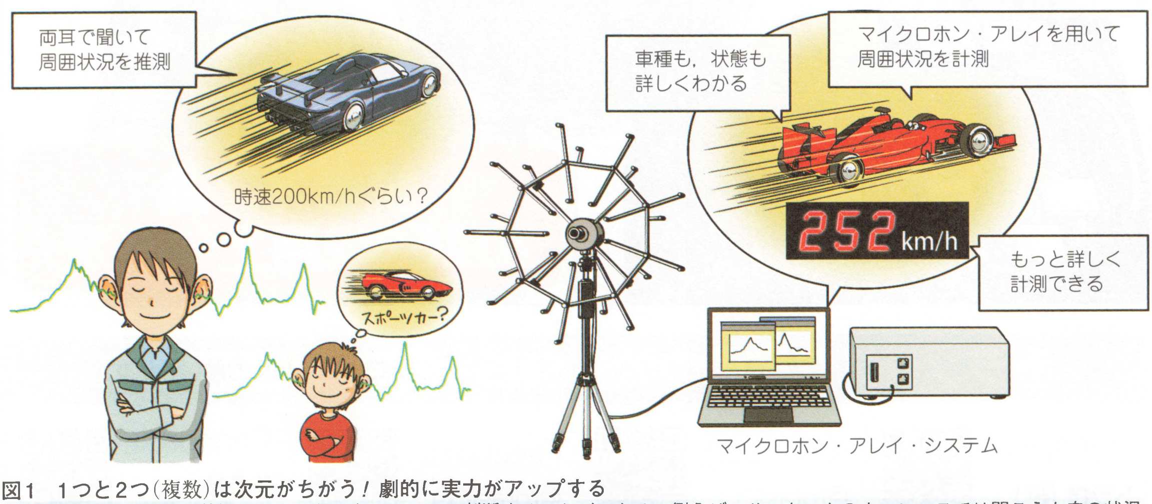


図1　1つと2つ(複数)は次元がちがう！劇的に実力がアップする
人は両方の耳で周囲の状況がどのようになっているか判断することができる．例えば，サーキットのカーレースでは聞こえた音の状況から自動車のスピードや車種を推測できる．音を拾うマイクロホンもアレイ状に配置すれば，もっと詳しく周囲の状況を計測できる

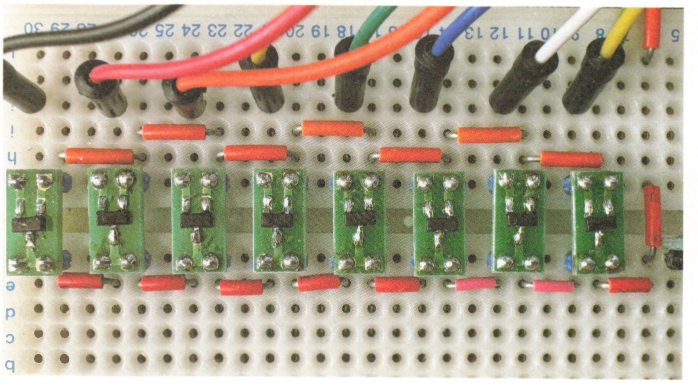


写真1　小回路を並べる背景には数学がいる…センサを並べて平均化すればノイズや個体ばらつきを「統計的」に減らせる
MCP9700（マイクロチップ・テクノロジー）を複数並べて，測定精度を向上させる温度センサ・アレイ

なくありません．

例えば，LEDを1個だけ点灯させても得られる光量には限界がありますが，数十個，数百個と並べて点灯させれば，単一素子では到底得られない明るさを実現できます．また計算機の世界ではスーパーコンピュータが代表的です．近年のスーパーコンピュータは，数百万個もの演算コアを並列に動作させることで，1台のプロセッサでは不可能だった膨大な計算を実現しています．ここでも「コアを並べる」「ノードを並べる」というアイデアが，性能を桁違いに押し上げる鍵になっています．

このように「並べる」という行為には，単なる数の積み上げにとどまらない工学的な意味とメリットがあります．

● メリット1：性能のスケーラビリティ

最もわかりやすいのは「性能の積み上げ」です．

▶電流容量の拡張

電源回路では，MOSFETやダイオードを並列接続して電流容量を拡大する設計がよく行われます．複数素子に電流を分担させることで，単一素子では扱えない大電流を安全に処理できるようになります．

▶光量の拡大

照明用LEDは1個あたりの光出力に限界がありますが，多数を並べることで強力な光源を作り出せます．プロジェクタやディスプレイ・モジュールも，LEDアレイなしには成立しません．

▶計算処理の加速

マルチコアCPUやGPUは，複数の演算素子を並べることで膨大な並列演算を可能にし，AI推論や科学シミュレーションといった分野を支えています．

● メリット2：冗長性と信頼性

並列化には，単に性能を増やす以上の意味があります．それが「冗長性」です．

▶ストレージのRAID

複数のHDDやSSDを組み合わせるRAID構成では，1台が故障しても他のディスクがデータを保持し続けます．並べることで，システム全体としての信頼性を飛躍的に高めているわけです．

▶通信システムの多重化

複数の通信回線を用いた多重伝送では，1本の回線が切断されても通信を継続できます．航空機や宇宙機器など，停止が許されないシステムでは必須の考え方です．

● メリット3：ばらつきの平均化

個々のセンサや素子には，製造上のばらつきや測定誤差がつきまといます．これを克服する手段としても「並べる」ことが有効です．

▶温度センサのアレイ

半導体温度センサを多数並べて測定値を平均すれば，ノイズや個体差を統計的に低減できます（**写真1**）．

▶撮像素子の画素配列

CCDやCMOSイメージ・センサは，数百万～数千万の光センサを並べていますが，個々の画素のばらつきはキャリブレーションと信号処理によって平均化され，結果として鮮明な画像が得られます．

● メリット4：制御の自由度拡大

単一の素子では得られない「空間的な自由度」を手に入れられるのも，並べることの利点です．

▶アンテナ・アレイとビーム・フォーミング

複数のアンテナ素子を一定の位相関係で駆動することで，電波の指向性を自在に操作できます．定番の八木アンテナ（**写真2**）をはじめ，5Gの基地局アンテナ，位相制御レーダなどが代表例です．

▶LED照明，ディスプレイ

複数のLEDを並べて個別に制御すれば，照度分布や色の分布を細かく設計できます．舞台照明や大型ディスプレイでは，アレイの制御技術そのものが表現力の源泉になっています．

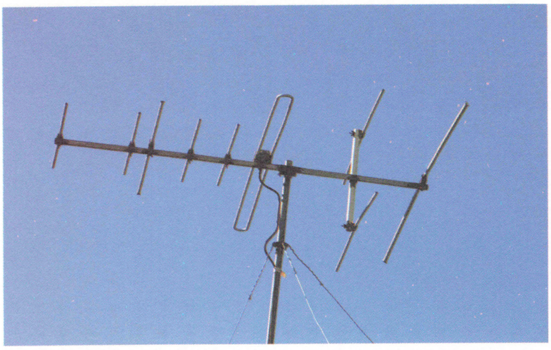


写真2　定番の八木アンテナ…アンテナ素子を直線上に並べて指向性を高めている
今は使われることがなくなったアナログ地上波向けVHFアンテナ

● メリット5：負荷分散と安全性

大電流や高熱，膨大な計算負荷を単一素子で処理するのは困難です．これを解決するのが「負荷分散」です．

▶パワー・エレクトロニクス

インバータやスイッチング電源では，複数のパワー素子に電流や熱を分散させることで，安全性と効率を両立します．

▶サーバ・クラスタ

データセンタでは，多数のサーバをクラスタ化して計算負荷を分散し，冷却も含めてシステム全体を安定動作させています．

● メリット6: 新機能の創出

最後に強調しておきたいのは,「新機能の創出」です.

▶カメラの撮像素子

多数の光センサを並べた撮像素子は，単一のフォトダイオードでは不可能な画像という情報を取得できるようにしました．

▶マイクロホン・アレイ

並べたマイクから音を収集し，到来時間差を解析することで音源方向を特定できます（前述の**図1**）．スマート・スピーカや会議システムなど，音声インターフェースの高度化には欠かせません．

数学が支える「ならべる」の力

工学的な効果の背後には，必ず数学があります．

● 数学1：ルートN則

信号をN個足し合わせると，出力信号はN倍に，ランダム・ノイズはおおよそ$\sqrt{N}$倍に増加します［**図2**（**a**）］．その結果，S/N比は$\sqrt{N}$倍に改善します．このシンプルな法則は，センシングや通信において大きな意味をもちます．

この現象は別の見方をすると，多数の測定値を平均すると誤差が$1/\sqrt{N}$に減少するともいえます［**図2**（**b**）］．この場合は，センサ・アレイを使って精度を高める際の基本原理です．

● 数学2：フーリエ解析と空間サンプリング

素子を一定間隔で並べると，その配置はフーリエ変換で表現できます．アンテナ・アレイやマイクロフォン・アレイの指向性パターンは，フーリエ解析の枠組みで定量的に予測でき，不要なサイドローブを抑える設計などにも利用されています．

● 数学3：信頼性工学・確率論

並列システムの信頼度は，素子数の増加に応じて指数的に向上させられる場合があります．これは信頼性工学・確率論の世界で定量的に議論されており，冗長構成の効果を数式で評価できます．

● 数学4：並列処理の法則

計算機アーキテクチャの世界では，並列化の効果をアムダールの法則やグスタフソンの法則で評価します．「プログラムの何割を並列化できるか」によって，コア数を増やしたときのスピードアップの上限が変わることを示す有名な式です．

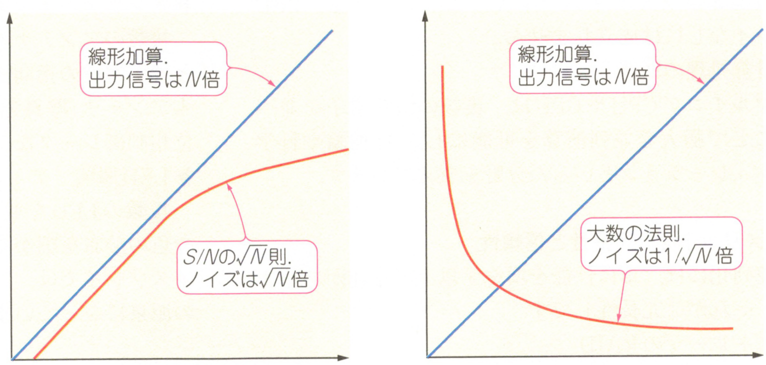


図2　工学的背景にある数学の例
（a）線形加算とS/Nの$\sqrt{N}$規則
（b）統計的平均化と大数の法則

イントロダクション2

使い方次第で性能広がる！アレイ部品図鑑

宮田 賢一 Kenichi Miyata

電子回路を作るとき，抵抗，トランジスタ，ダイオードといった部品を1つずつ配置するのが基本です．しかし近年では，これらを複数まとめて1つのパッケージに収めた集合部品(アレイ部品)が広く使われています．この並べるという設計思想は，単なる省スペース化にとどまらず，ばらつきの低減，信号の一貫性，そして新しい機能の実現につながっています．

本稿では，代表的な集合部品を基本部品編とセンサ編に分けて紹介します．抵抗からFPGA，センサまで，電子回路におけるアレイ構造の広がりを見ていきます．

抵抗やトランジスタの集合体から，センサやFPGAの大規模アレイに至るまで，共通しているのは，同じ素子を並べることで新しい性能を得るという発想です．それは，精度を上げる，処理を速くする，空間を広げる…といった多方向の拡張性を可能にします．

アレイとは，単なる“まとめる”技術ではなく，電子回路における並列性の表現形なのです．ミクロな回路レベルでの“並べる”工夫が，マクロなシステムの性能向上を支えていることを，集合部品は教えてくれます．

基本部品編

● 集合抵抗：抵抗の整列がもたらす安定性

抵抗アレイは，複数の抵抗素子を1つのパッケージ内に集積した集合部品です．複数の抵抗を単純に並べたものではなく，用途に応じた内部回路構成のバリエーションが用意されています．

たとえば，すべての抵抗の一端を共通端子に接続した共通端子型は，ディジタル入力のプルアップ/プルダウン抵抗として最適です．抵抗が直列に接続された直列型は分圧やA-Dコンバータの入力スケーリングに利用されます．階段状に接続してタップを取り出すラダー型は，R-2R型D-Aコンバータの定電圧分割に使われ，また2つの抵抗を1組としたツイン抵抗型は，OPアンプのゲイン設定やブリッジ回路で重宝されます．

このように，抵抗をアレイ化して1パッケージに収めることで，抵抗値のマッチング精度と温度特性の均一性が得られます．さらに，基板面積の削減，はんだ

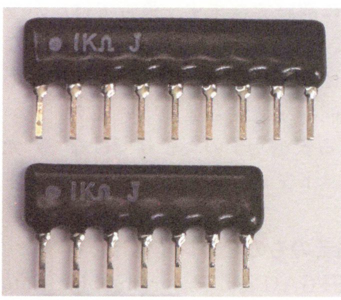


写真1　市販の集合抵抗

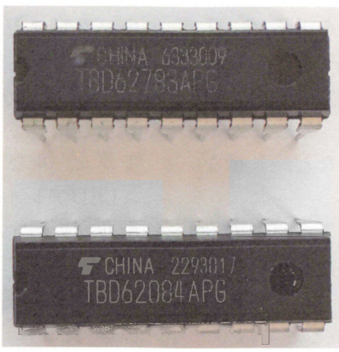


写真2　8チャネル・ソース・タイプDMOSトランジスタ・アレイ
TBD62783APG(東芝デバイス＆ストレージ)

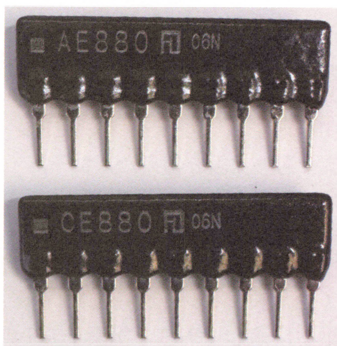


写真3　ダイオード・アレイ
AE880(アノード・コモン)，CE880(カソード・コモン)，福島双羽電機

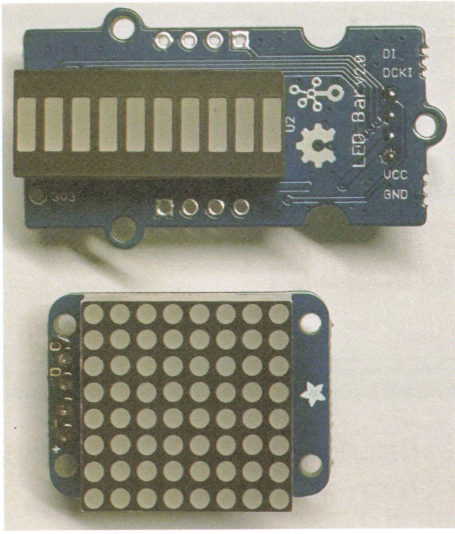


写真4　LEDアレイ・LEDマトリクス
Seeed Studio（上），Adafruit（下）

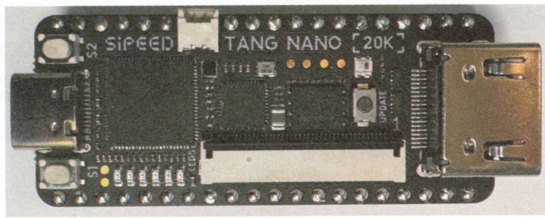


写真5　FPGAは論理回路のアレイ
FPGA基板GW2AR-18（GOWINセミコンダクター）．左の大きなチップがFPGA

付け点数の減少，回路の整然化といった実装上のメリットも大きいです．

集合抵抗は，電気的特性を「そろえる」ための工夫が形になった部品といえるでしょう．**写真1**に集合抵抗の例を示します．

● トランジスタ・アレイ：スイッチ素子を束ねて使う

トランジスタ・アレイとは，複数のトランジスタを1つのICパッケージにまとめたものです．個別素子を8個並べた場合に比べ，素子間のばらつきが小さく，同一温度下で動作するためスイッチングの均一性と信頼性が向上します．

内部構成にはいくつかのタイプがあります．トランジスタへの電流の向きの観点で分類した場合，電流を吸い込む構成のシンク型と電流を送り出す構成のソース型があります．いずれの型もトランジスタはオープン・コレクタで構成されます．

その他の分類としては，高電流ゲインを得るダーリントン接続型アレイ，NPN＋PNPを組み合わせて双方向駆動を可能にするプッシュ・プル型，高耐圧のDMOSを並べたオープン・ドレイン型，そして過電流や過熱保護を備えたスマート・アレイなど，多様な構成があります．

一例として，**写真2**に示すソース・ドライバ型のトランジスタ・アレイ部品TBD62783APG（東芝デバイス＆ストレージ）は，LEDアレイやリレーなどの正側駆動に適しており，“8素子を1つの部品として扱う”感覚で設計できます．アレイ化は，回路を小さくするだけでなく，“設計を整理する”手法でもあるのです．

● ダイオード・アレイ：すべてのラインを守る

写真3に示すダイオード・アレイは，複数の整流用または保護用ダイオードを1つのパッケージにまとめたものです．構成には共通カソード型，共通アノード型，直列接続，ブリッジ型などがあり，目的に応じて選べます．

特に，ESD保護ダイオード・アレイは，USBやHDMIなどの高速信号ラインの静電気放電からデバイスを守る重要な部品です．信号ラインを複数同時に保護できるため，レイアウトを簡略化しつつ，各チャネルで同等の保護性能を確保できます．

さらにアレイ化によって素子間の温度特性がそろい，同一動作条件下での電圧降下やリーク電流が均一になります．キーボードのマトリクス配線での逆流防止や電源ラインのクランプなど，多入力回路で同条件の動作を必要とする場面に適しています．

● LEDアレイ，LEDマトリクス：光を並べて情報を描く

写真4に示すLEDアレイは，複数のLEDを格子状に並べた発光デバイス群です．行列状に配置し，行と列を順番にスキャンして点灯を制御する方式をLEDマトリクスと呼びます．

アレイ化によって，わずかな制御線で多数のLEDを扱えるため，7セグ表示器から大型ディスプレイまで，あらゆる分野に応用されています．

LEDマトリクスは，1行ずつ高速で点灯するダイナミック点灯方式が一般的で，PWM制御を組み合わせることで輝度を自由に調整できます．最近では，ドライバICを使うことで，マイコンとの接続も簡単になりました．さらに，RGBフルカラー化やI^2C制御対応モジュールなど，機能的な進化も進んでいます．

LEDアレイは単なる表示素子の集まりではなく，光を並列制御するプラットフォームへと発展しています．

● FPGA：論理回路そのものをアレイ化

写真5に示すFPGA（Field Programmable Gate Array）は，ハードウェアの世界における究極のアレイ構造です．内部には数千～数百万個の論理セル（Logic Cell）が碁盤目状に並び，それらを配線リソー

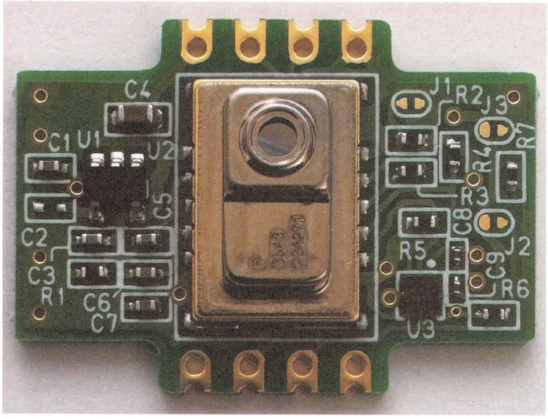


写真6　熱を検出する赤外線アレイ・センサ
Grid-EYE(パナソニック)

スで自由に結合して任意の回路を構成します．

このアレイ状の構成単位をCLB(Configurable Logic Block)と呼び，1つ1つが小さなゲート回路として機能します．

アレイ化の利点は，汎用ICやマイコンでは実現できない並列処理を自在に構成できることです．たとえばディジタル・フィルタや画像処理では，複数のデータを同時に演算することで，ソフトウェアより桁違いに高速な処理が可能になります．さらに，回路を後から書き換える再構成可能計算(Reconfigurable Computing)ができる点も，FPGAならではの特徴です．

抵抗アレイやトランジスタ・アレイが物理的な並列化なら，FPGAは論理的な並列化を体現する存在といえるでしょう．

センサ編

● 赤外線センサ・アレイ：熱を見る「64の目」

写真6に示すGrid-EYE AMG8833(パナソニック)に代表される赤外線センサ・アレイは，8×8＝64素子の熱検出素子を1チップに集積したデバイスです．各素子が独立して赤外線放射エネルギーを検出し，温度分布を2次元マップとして取得できます．

アレイ化の利点は，単点検出では得られない空間的な温度情報を得られることです．たとえば，センサー出力を補間してヒートマップ化することで，人の動きや熱源の位置をリアルタイムに可視化できます．サーマルカメラほど高価でなく，教育・ロボット・IoT実験にも適しています．

● カラー・センサ：光を分解して見る

写真7に示すS13683-03DT(浜松ホトニクス)は，RGBの3色に対応する光検出素子をアレイ状に配置したカラー・センサです．受光部には赤・緑・青のフィ

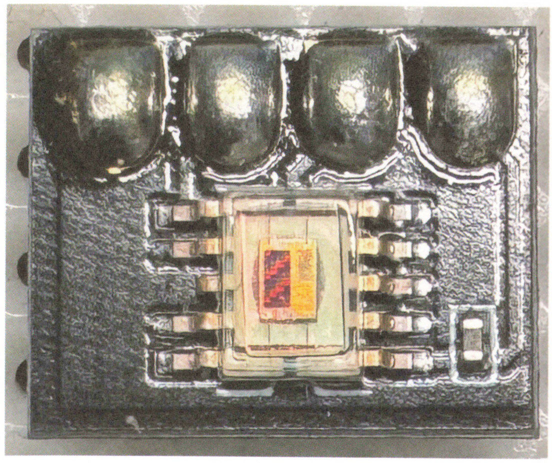


写真7　カラー・センサ・アレイ
旧モデルのS11059-02DT0(浜松ホトニクス)

ルタがモザイク状に並び，入射光を分光的に分離して測定します．

アレイ化により，単点では得られない色むら・反射分布の検出が可能になり，ライン検査やディスプレイ調整などに利用されます．またI^2C接続で扱えるため，マイコンによる色識別や照度補正にも応用できます．

アレイ配置によって，光の「空間情報」を測れることが最大の利点です．

● 加速度センサ・IMU：並べて精度を上げる

写真8に示すSpresense用マルチIMUアドオン・ボード(ソニーセミコンダクタソリューションズ)は，6軸または9軸センサを複数搭載したアレイ構成が特徴です．加速度・ジャイロ・地磁気の各センサを複数点配置することで，単一センサでは補えない姿勢情報を高精度に算出できます．

アレイ化により，各センサのノイズを統計的に平均化し，ドリフトを低減します．さらに，カルマン・フィルタなどのセンサ・フュージョン処理を組み合わせることで，安定した3D姿勢推定が可能になります．

このように，アレイ化は“多軸化”だけでなく“高精度化”をもたらす手段でもあるのです．

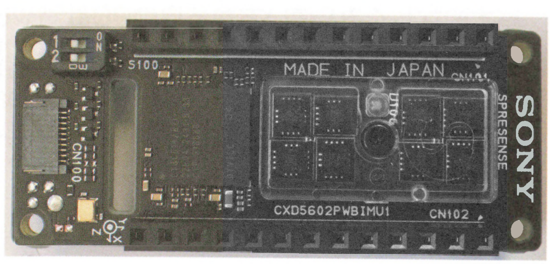


写真8　加速度センサなどの慣性センサIMUアレイ
Spresenseマルチ IMUアドオン・ボード(ソニーセミコンダクタソリューションズ)

コラム　並べて性能アップの筆頭格「アンテナ」

● 電波の位相を用いてビーム方向を制御するアンテナ・アレイ

広い意味での電磁波のうち波長100 nm〜1 mmは光(紫外光，可視光，赤外光)と呼ばれます．波長1 mm以上はいわゆる電波ですが，波長が長くなるほど解像度が低くなり，2次元アレイによる画像化には適していません．

一方，複数のアンテナを1列に並べて，それぞれの電波の位相が揃えば電波が強まり，位相がずれれば電波が弱まるという原理で指向性をもたせて，ゲインを高めたアンテナが作られてきました．SHF(3 GHz〜30 GHz)などの通信やレーダの用途では，放物面状の反射器を用いて単一のアンテナで強指向性と高ゲインを実現するパラボラ・アンテナが多く用いられてきました．最近では複数の小型アンテナを2次元のアレイ状に配列し，各アンテナの位相を制御することで動的に指向性やゲインを調整できるフェーズド・アレイ・アンテナが広く用いられています．

最近ではWi-Fiなどパソコンやモバイル機器の通信でも，複数チャネルで同時に通信して高速化できるMIMO(Multi-Inout Multi-Output)に対応したマルチアンテナが普及し，さらに5 Gや6 GのWi-Fiでは，フェーズド・アレイ・アンテナを用いてMIMOとビームフォーミングの両立が可能となり，アンテナ・アレイが普及し始めています．

さらに，スマートフォンなどでは，Bluetooth(BLE)のビーコンを用いたごく近距離の測位，位置検出が普及していますが，Bluetooth5.1ではビーコン受信器側で信号方向を検出するAoA(Angle of Arrival)や，ビーコン送信器側で信号方向を制御するAoD(Angle of Departure)の規格が盛り込まれています．いずれも，4×4などの小規模なアンテナ・アレイを用いて超小型かつ低コストでビームフォーミング制御を実現し，従来のビーコン測位よりも大幅に精度を向上しています．〈宮崎 仁〉



写真9　8×8距離センサ・アレイ
8×8ToFアレイVL53L5CX(STマイクロエレクトロニクス)

● 距離センサ：空間を測るアレイ

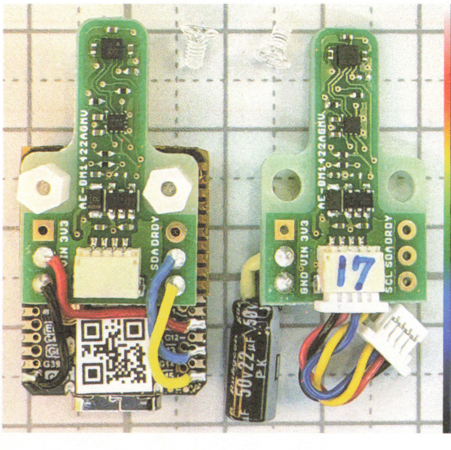
写真9に示す距離センサ8×8 ToFアレイVL53L5CX(STマイクロエレクトロニクス)は，8×8＝64点のToF(Time-of-Flight)測距素子を1パッケージに集積した距離センサ・アレイです．

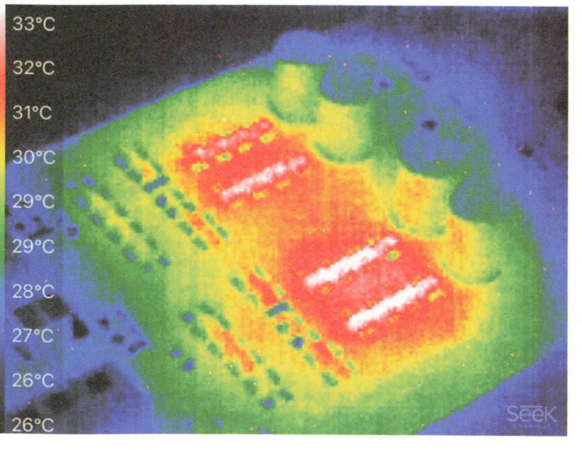
各画素が独立して距離を測定し，視野内の奥行き情報を深度マップとして出力します．単一測距センサでは得られない空間的な深さの分布をリアルタイムに取得でき，ロボットの障害物検出やジェスチャ認識，SLAM(自己位置推定)などに活用されています．

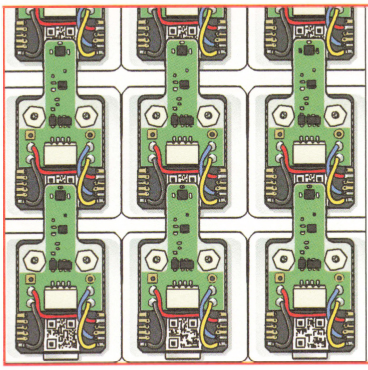
アレイ化によって，光学センシングは点から面へと進化しました．

第1部

小っさい回路を並べる！実力けた違い回路の製作





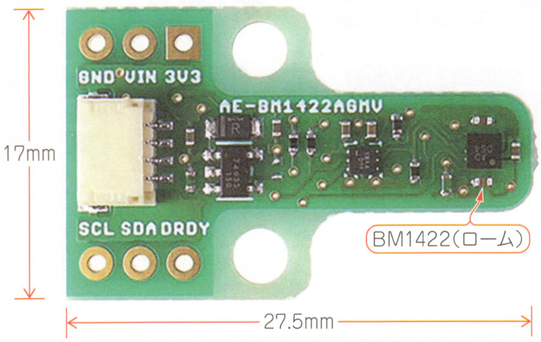


第1章　高速1 kHzサンプリングで電流のスペクトルGet！微小アナログ信号測定のお伴

手強い磁気ノイズまる見え！高感度センサ・アレイの製作

鮫島 正裕 Masahiro Sameshima

本誌2024年10月号の秋月電子通商の広告で**図1**の地磁気センサ・モジュールが紹介されていました．



(a) モジュール本体

動作電源電圧範囲(AVDD)	1.7～3.6 V
動作時消費電流(100 SPS)	0.15 mA(Typ)
測定可能入力磁気範囲	±1200 μT(Typ)
磁気感度	0.042 μT/LSB(Typ)
許容最大磁界	1000 mT
動作温度範囲	−40～＋85℃

(b) 地磁気センサBM1422の特性

図1　地磁気センサ・モジュールAE-BM1422AGMV
気になっていたMI式の地磁気センサを使ったボードが販売開始．税込み980円

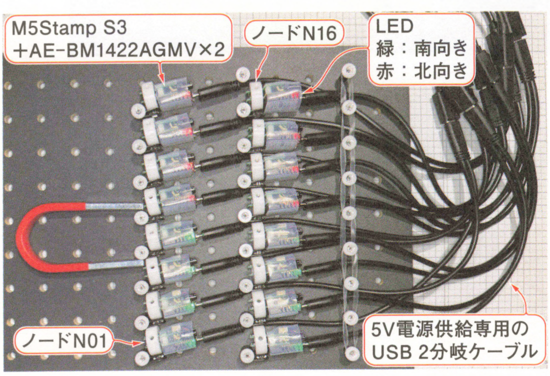


写真1　手強い磁気ノイズを丸見えにできる磁気センサ・アレイ
1 kHzサンプル16ノード．データは無線LANで伝送．動作テスト中

型名を調べてみると，磁気インピーダンス方式(以下，MI方式)のセンサが搭載されていることがわかり，試してみようと思いました．値段も980円で，Qwiicというタイプの汎用コネクタ対応なので楽に動作確認ができます．

MI方式センサは，ホール・センサに比べて高感度でノイズが低く，pT(ピコテスラ)レベルの生体磁場観測にも応用されています．高速応答という特徴もあり，センサの出力をサンプリングして結果をFFTすることで，周波数特性を見てみたいと考えていました．

この地磁気センサを複数並べて，手強い磁気ノイズを丸見えにできる高速1 kHzサンプリングの検出器を製作しました(**写真1**，**写真2**)．

高感度磁気センサの応用

● 高感度磁気センサを何に使うか？

製造検査で，pA(ピコアンペア)レベルの微小な電流試験項目を検



写真2　地磁気センサAE-BM1422AGMVを2つと小型マイコンM5Stamp S3を1つのノードとして16並列する
2台の磁気センサの平均値で遠方界，差分で近傍界に対応

下記リンクにて関連データ公開中です．
https://toragi.cqpub.co.jp/download2026/

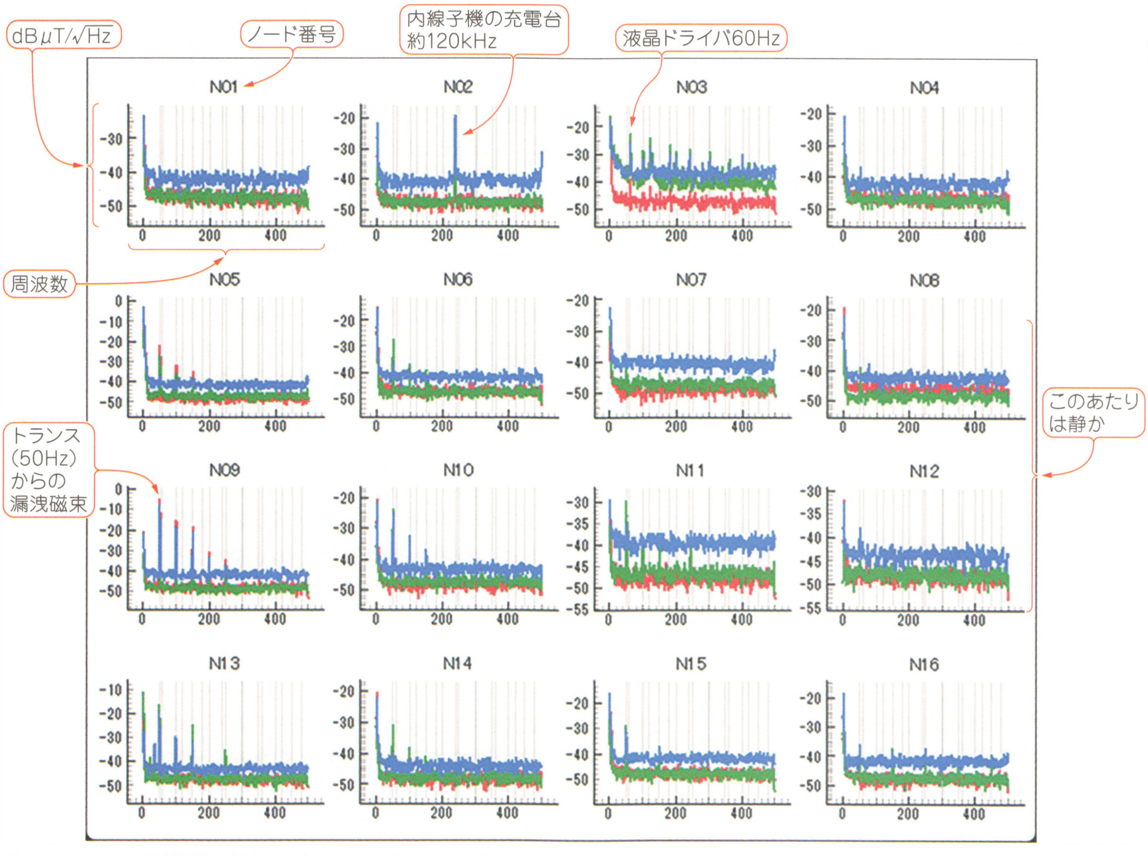


図2　16ノード地磁気センサ・アレイの3軸FFT表示
センサをグリッド配置することで，測定システムのどのあたりに磁気ノイズがあるか把握できる

査する測定装置では，装置周辺数メートル範囲の電磁ノイズを0.1 Hzあたりから数GHzまでの範囲で把握しておく必要があります．当たり前の話ですが，製造検査システムは大きなものから小さなものまで電気の力で動く装置を多用しています．そのなかには，10 A以上の電流で動作するポンプや温度制御システムがあり，照明や測定器の電源機器も多数あるので，システム内のノイズ発生源をなくすのは不可能です．

そこで，測定システム周辺のどこにどのくらいの周波数の電磁エネルギー源があって，それが空間磁界や電線や金属筐体表面などの電流を介してどのように伝播しているかを，おおまかに把握しておくのが重要になります．そして，把握したノイズのエネルギー源の位置や伝播の経路を変更するのがノイズ対策になります．

ノイズ源と伝搬経路を把握して変更することによって，今まで研究室でしか測れなかった検査が可能になったり，妥当な結果を得るのに必要だったアベレージング時間を減らしてテスト時間を短縮できたりします．

● 手強い磁気ノイズは抜本的に対策したい

静電ノイズは比較的容易にシールドできますが，低周波磁界は表皮効果の厚さの都合でシールドが面倒という問題があります．信号線を差動伝送にするにしても，ほかの配線と差動線路で形成されるループに外部磁束が鎖交することで，差動線路に対して同相電流ノイズとして重畳することもあり，同相除去比とかどうだったかといった面倒くささを減らすには，磁気ノイズのエネルギー源の把握と距離を可能な限り離すというのがノイズ対策の第一歩になります．

そのため，ハンディ式の磁気メータや，センス・コイルとオシロスコープの組み合わせでシステム周辺の磁気レベルを確認して把握するのですが，冷却運転時にしか動作しないポンプや近くの検査装置が動作したときだけ発生するなどのときどき発生するノイズもあるので，何点かのチェック・ポイントにセンサを配置しておいて，同時にしばらくの時間モニタする必要がありました．

また，センス・コイルとオシロスコープなどを使用した方式での測定点の多点化は，アナログ的な配線の取り回しやオシロスコープのチャネル数などのコスト的にも困難なところがあり，そういった意味でも簡易に磁気だけに反応する小型センサを探していました．

1 kHzサンプリング磁気センサ・アレイ

写真1と**写真2**は，2台の地磁気センサ・モジュールAE-BM1422AGMV(秋月電子通商)とM5Stamp S3をI^{2}Cで接続したものを1ユニット(ノード)として，16台の動作テストをしているところです．USBケーブルは5V電源の供給専用で，データは無線LANでノードIDとともにパソコンへ伝送するようにしています．

地磁気センサというとゆっくりとした地磁気の検出のようなイメージがありますが，BM1422AGMV(ローム)は4サンプルのアベレージング動作が0.5 msで完了するので，1 kHzで3軸の磁界をサンプリングできます．サンプルされたデータは400 kHzのクロックのI^{2}Cで転送します．

M5Stamp S3は処理速度とメモリ容量に余裕があるため，地磁気センサ2台の3軸の各軸の*XYZ*値を演算したものを1024サンプルぶんバッファリングして，地球磁場などのDCオフセット値を引き算したあとの各データをFFTして，さらに16回の移動平均をしてから，*XYZ*の3軸の周波数情報としてパソコンに無線LANで転送できてしまいます．

● センサの並列動作

センサを2台接続しているのは，センサのノイズ・フロアの平均化によって無相関ノイズの場合の−3 dB

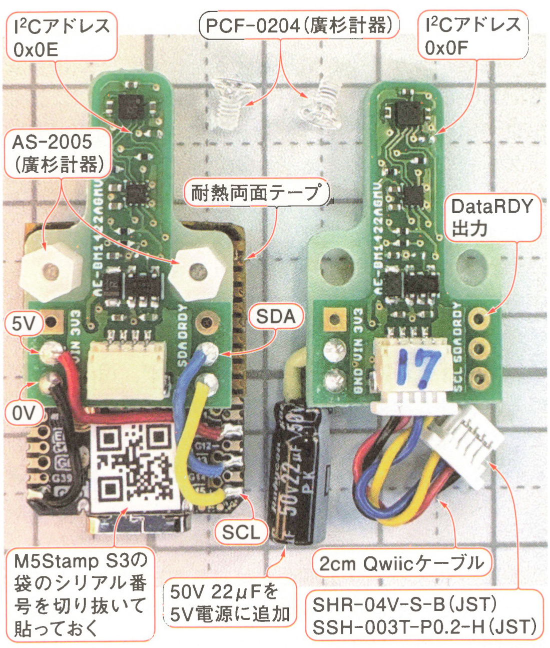


写真3　センサ・ノードの製作…2台の地磁気センサの配線
I^{2}Cアドレスの設定と接続．5Vの給電側に22 μFの容量を追加する

の改善と，差分動作させて電源ケーブルなどの差動電流検出にも対応するためです．高感度磁気センサの品種によっては，複数のセンサを近接動作させる場合に，動作クロック干渉などの対策が必要なものがありますが，AE-BM1422AGMVは密着させても問題はなさそうでした．

● センサ・アレイのグリッド配置

実際は，複数のセンサ・ノードを50 cmから1 m間隔のグリッドで配置して，測定システム周辺の磁界を確認します．この試作品のデータ伝送は無線LAN接続で，各ノードは5V電源を供給するだけでよいので，モバイル・バッテリでも運用可能です．

消費電流は，FFT計算と無線LAN送信のため，1ノードあたり100 mA程度になります．測定環境によっては，無線LANなどの電波の放出が禁止されているところがあるので，その場合はシリアル接続のUSBハブ経由でノード数を減らして運用する予定です．

2025年11月時点でM5Stamp S3は生産終了品ですがまだ入手可能です．M5Stamp S3Aが後継品として使用可能です．S3Aは，オンボードのLEDの制御に電源供給設定が必要など若干異なるのと，消費電流がS3に比べて5〜10 %大きくなるようです．

● 16ノード3軸のFFT表示

図2は，4×4のアレイで配置した各ノードから送られてきた3軸のFFTのWelch平均結果を，まとめて表示した例です．縦軸は1 μTを0 dBとしたdB$\mu T/\sqrt{Hz}$で，フロア・ノイズは*XY*軸が約−45 dBで，*Z*軸は個体差がありますが−40 dB前後です．

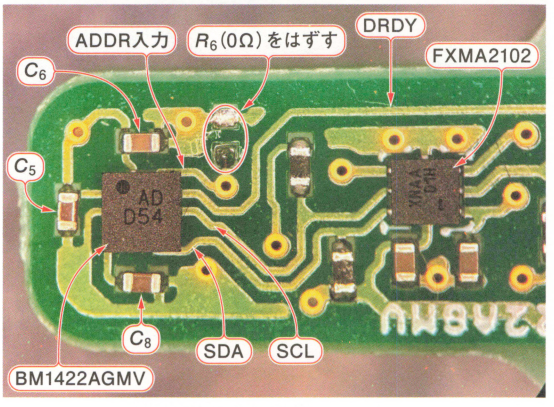
欲を言えば，1 nT台の−60 dB以下のノイズ・フロアであれば漏電電流経路などもわかるようになるのですが，10 nT台の−40 dBが見えれば太めの電力線やトランス，電動機の存在を発見できるようになります．また，感度が0 Hzからあるので，鉄製の荷物台車の通過やセンサ近くでの工具の使用が検出できます．

● MIセンサの周波数応答

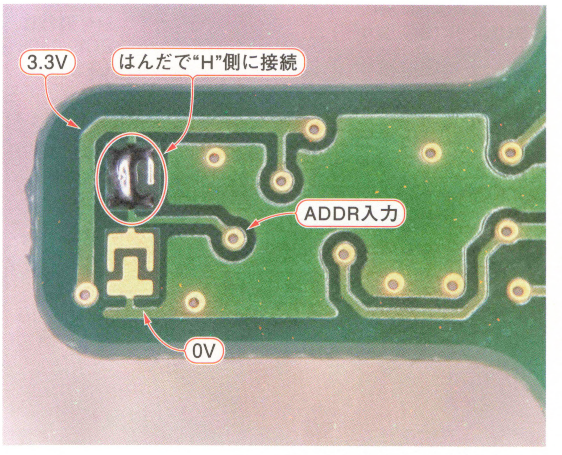
図2の横軸は周波数で，1 kHzサンプリング動作のFFTなので500 Hz幅です．ただし，MIセンサは結構広帯域で，アンチエイリアシング・フィルタを実装していないので，エイリアシング波形として1 MHz以上の磁気ノイズにも応答してしまいます．

図2のN02の真ん中あたりに立っているスペクトルの表示上の周波数は250 Hzあたりですが，実際はN02の近くにあった内線電話子機の充電台からの漏洩磁束で，オシロスコープと磁気プローブで確認したところ周波数は約120 kHzでした．

エイリアシングが出るのは計測用途としてはNGな



（a）表側



（b）裏側

写真4　片方の地磁気センサAE-BM1422AGMV基板のI²Cアドレスは0x0Fに変更
R_6(0Ω)抵抗を外して裏面で"H"に接続することでI²Cアドレスが0x0Fになる

感じになりますが，ノイズを検出するという用途では，センサ・ゲインが不定であっても1 MHz程度まで感度が伸びていることはとてもありがたいです．なにか変なスペクトルが立ったら，その場所の周辺をオシロスコープとアンテナや磁気プローブで再確認するという運用になります．

センサ・ノードの組み立て

写真3はセンサ・ノードの接続のようすです．配線は，M5Stamp S3と2台のセンサ・モジュールをI²C接続するだけです．一方のセンサ・モジュールははんだ付けで，もう一方のセンサはQwiicケーブルで接続します．市販の2 cmのQwiicケーブルが見つからなかったので，JSTの圧着コネクタ(SHR-04V)と地磁気センサのおまけのケーブルをつないで製作しています．

一方のセンサ・モジュールに付いている電界コンデンサは22 μFで，センサの5 V電源に接続してあります．これは，この構成での5 V入力側の静電容量が低く，全長10 m以上のケーブルで給電する際に不安があったために，ダンピング目的もかねてESRが高めの22 μFを追加しています．

また，基板端部のコネクタ近くという曲げ応力が気になるポイントに，大き目の積層セラミック・コンデンサを後付けするのは見た目的に格好悪い感じがしたというのもあります．ちなみに，S3の後継機種のM5Stamp S3Aでは，5 V側に10 μFが追加されています．22 μFで4×4のグリッド16台で1系統の電源で運用する場合は，合計の静電容量が352 μFになります．

● I²Cアドレスの変更

センサの出荷時のI²Cアドレスは0x0Eで，**写真4**のようにアドレス設定用の0Ω抵抗のR_6をはずして，基板裏面のジャンパをはんだでブリッジすると，I²Cアドレスが0x0Fになります．R_6は小さいので，はんだごての先にはんだを盛って，抵抗をまるごとすくい取ることができます．はんだこてを持つ手が震えてしまうと，C_6までこて先が行ってしまう可能性があるので，平ピンセットなどでC_6側からR_6をはさむようにするとよいと思います．

● 皿ねじ加工

センサ・モジュールをM2の皿ねじで取り付けるため，**写真5**のように面取りカッタなどでモジュール基

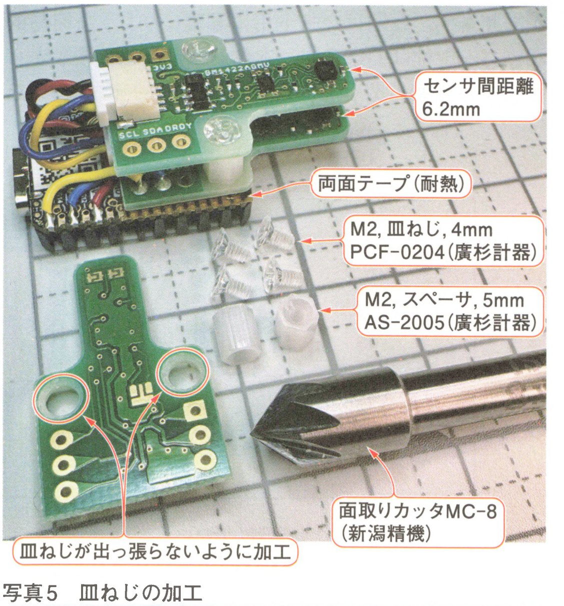


写真5　皿ねじの加工
ガラエポの粉が飛ばないようにアルコールなどで湿らせて加工する

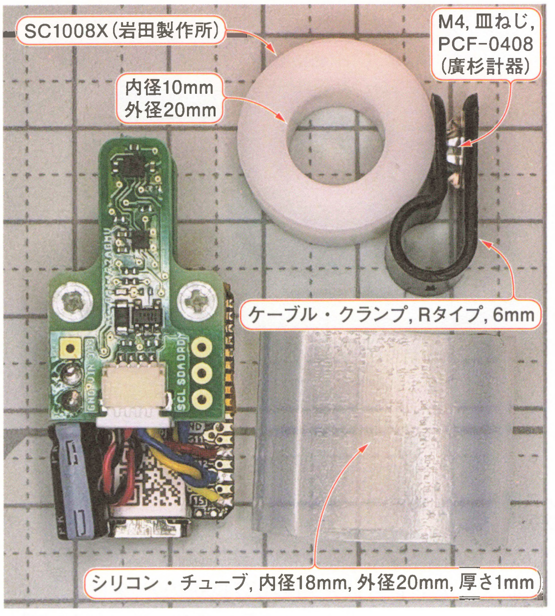


写真6　センサ部と本体の保護
ケーブル・クランプは片側をM4皿ねじで固定して，線や薄板に引っ掛けられるようにする

板の裏面を皿ねじ加工します．ねじの出っ張りをなくすことで，両面テープで張り付けることができます．

M2のスペーサは5 mmのもの(AS-2005, 廣杉計器)を使用しました．基板の厚さが1.2 mmなので，センサ間の距離は6.2 mmになります．

● センサの保護と簡易カバー

実際の運用ではセンサを床に設置した際に足で踏まれる可能性が高いので，硬い樹脂ケースに入れる必要があります．今回はテスト用に**写真6**のような簡易的なカバーを付けています．本体側は電気的な接触から保護するため，外径20 mmのシリコン・チューブを

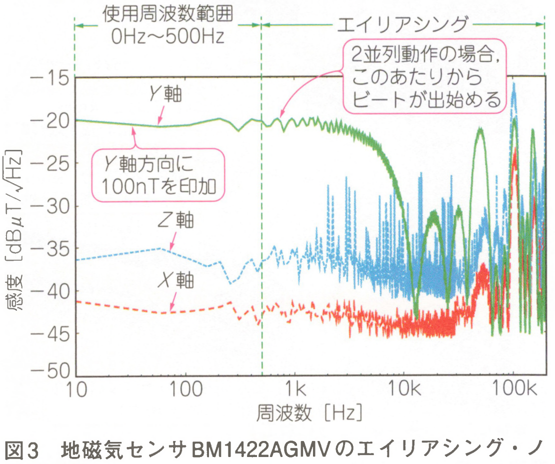


図3　地磁気センサBM1422AGMVのエイリアシング・ノイズ感度
100 nTの磁界を10 Hzから50 Hzステップでスイープしたときの単体のMIセンサ・モジュールの応答

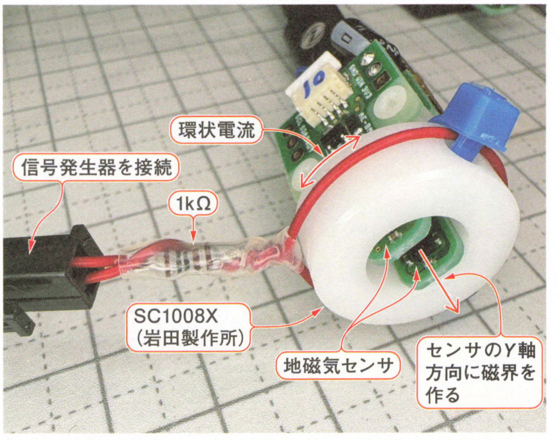


写真7　製作した1ターンのコイル動作確認用キット
半径10 mmの1 mAの環状電流の中心で62.8 nT，中心から3 mmずれたところで約59 nT．1.7 mAで約100 nTとなる

2 cmの長さに切ったものをかぶせています．

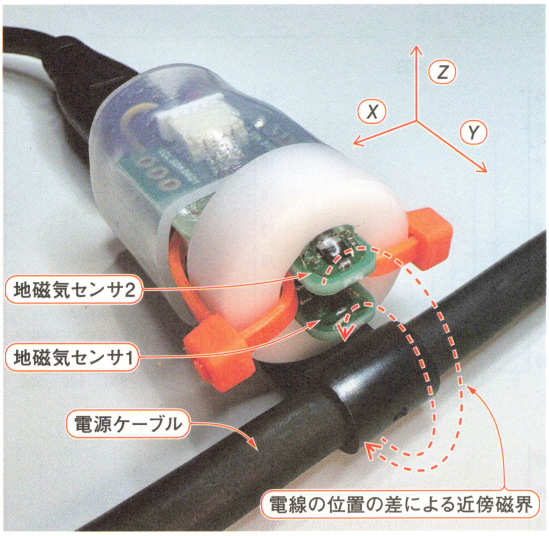
センサ側はPOM樹脂製のセットカラー(SC1008X, 岩田製作所)がちょうどはまったので，金属のセット・スクリューを外して，代わりにM4のプラねじ(PCF-0408，廣杉計器)でケーブル・クランプを取り付けています．はめただけですと簡単に抜けてしまうので，**写真2**のように結束バンドでM2のポストに固定しています．結束バンドをノード番号に対応したカラー・コードにしておくと，離れたところからもノード番号がわかりやすく，なんだかちょっと可愛いくもなります．

動作確認

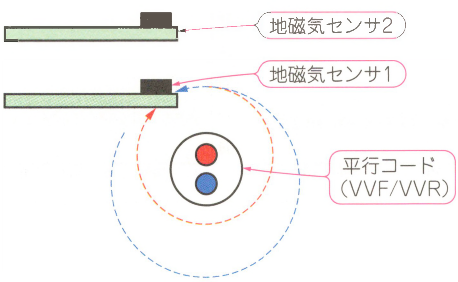
用途としては磁気ノイズ源の発見であって計測ではないので，厳密な校正は必要ないと考えています．ただ，ノイズ・レベル勾配の確認として，各ノードの感度の差が数dBの範囲内には入っていてほしいので，**写真7**のような動作確認キットを作成しました．センサの保護用に用意した樹脂製リングの直径が20 mmなので，ここに電線を1ターン巻いて，半径が約10 mmの環状電流を流せるようにします．

● ビオ・サバールの法則

センサのサイズが小さいので，ヘルムホルツ・コイルではなく1ターンのコイルにしました(**写真7**)．ビオ・サバールの法則から，半径10 mmで1 mAの環状電流が流れたときの中心の磁界は，周辺の透磁率を真空の透磁率とすると，4π×電流÷環の直径で62.8 nTです．センサの位置が電流の中心から約3 mmずれているところは計算がすごく面倒ですが，概算で59 nTになります．センサ1とセンサ2を加算平均モードで動作させたときに，1 mAでだいたい60 nTとなればOKという判定方法にしました．



（a）電源ケーブルの電流値を推定中



（b）構造

写真8　グラディオメータ式電流検出
地磁気センサのXYZ軸2セットの差分のベクトル・データと位置関係からおおよその電流値(直流～500 Hz)が推定できる

● 周波数特性とエイリアシングの確認

写真7の方法でセンサのY軸方向に，信号発生器から1.67 Vの交流信号を10 Hzから200 kHzまで50 Hzステップで印加したときの応答特性を**図3**に示します．周波数帯域の500 Hzまでは，おおよそ印加電流の1.67 mAに対する100 nT(－20 dB)が計測できています．そこから周波数を上げていくと，アンチエイリアシング・フィルタを実装していないので，エイリアシング雑音が見え始め，さらに周波数を上げていくとX軸とZ軸の出力にも反応が見え始めました．

図3のグラフは200 kHzまでですが，100 kHz以上の傾向が1 MHz以上まで続いていました．1 MHz近辺の応答特性は，センサの近くの回路パターンの影響もあるのではないかと思いましたが，今回は深く考えないことにしました．

グラディオメータ・モードによる電源ケーブルの電流検出

グラディオメータ(Gradiometer；勾配磁界センサ)は，近接する2点の磁気センサの差分をとることで，

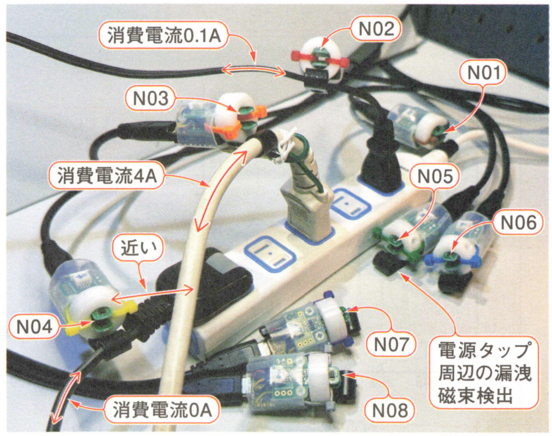


写真9　電源ケーブルの近傍磁気観察
多点同時観測で，流れの経路感がつかめる

遠方からの外乱をキャンセルして近傍の磁界の乱れを検出することができます．

写真8は，グラディオメータの仕組みを利用した電源ケーブルの電流検出のようすです．電源ケーブル内の2本の線に行き来する逆向きの電流値が同じでも，電線の数mmの位置の違いから，電源ケーブルの近傍には磁界が存在し，検出可能です．もともとは地磁気センサなので直流電流も検出可能です．

電線の内部構造やクランプしたときの位置関係によって，検出できる磁界にばらつきがあるので，精密な電流計測はできませんが，1 A以下か5 A前後か10 A以上かといった分解能で電流が流れているかどうかがわかります．装置を動かしたまま電源ケーブルの電流を確認できるので，電力消費状況の確認に便利です．

なお，5 Aを超える電流の場合，ケーブルとの位置関係によってはセンサが飽和する可能性があるので，ソフトウェアに飽和検出を追加する必要があります．

● 同相電流と差動電流の分離

漏電(同相電流)がある場合，差動電流との分離をどうするかという課題があり，0.5 A以下の消費電流の機器が動作しているのか電源OFFで漏電電流だけが流れているかの判別が難しいという問題があります．

クランプ式の漏電電流計を併用すれば一発でわかりますが，それでは多点の状況を簡単に把握できるという特徴がなくなってしまいます．センサの位置関係を対向させるなどすれば，できそうな気がしているのですが，今後の課題にします．

ざっくり電流計の実装

写真9は，電源タップに3本の電源ケーブルがつながっていて，どの電源線が電流を食っているかを判定

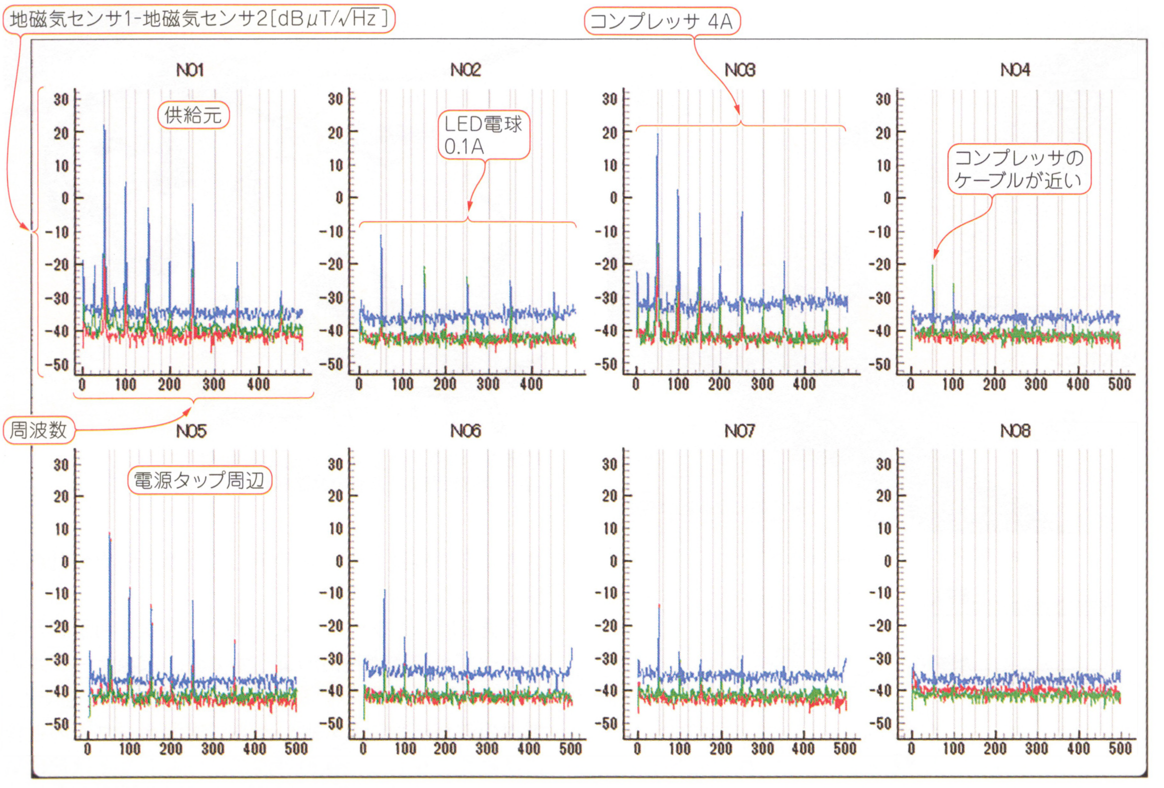


図4　近傍界検出モードの8ノードからの3軸データ表示
各ノードの2次3次の高調波の違いから負荷の電流嗜好性（特徴）が学べる

するという想定の接続です．8台のグラディオメータ・モードの磁気センサを使用しています．

N01は電源タップの電線で実際には約4.1 Aの電流が流れています．N02はLED電灯につながっていて約0.1 Aの電流．N03はコンプレッサに接続していて，約4 Aの電流が流れています．N04には負荷がつながっていません．N05～N08の4ノードは電源タップの近くに配置して，電源タップからの漏洩磁束を確認します．

● 誰が電気を消費しているか？

図4が各ノードから送られてきた磁気スペクトルです．縦軸はdBμT/$\sqrt{\text{Hz}}$です．4 Aを消費しているコンプレッサの電源線N03電源タップの元電流N01はdB表示的にはほぼ同じ値になっています．N04には何もつながってないのですが，ちょっとスペクトルが立っています．これはコンプレッサに行っているケーブルが近いので，そこからの漏洩磁束の影響だと思います．N05は電源タップの近くにあり，ここはコンプレッサへの4 Aの上流にあるので検出があります．N07も電源タップの近くにありますが，コンプレッサへ行っている電流はここの近くにはないので，N07とN05には差があります．

● スペクトル観察は楽しい

クランプ式の電流計はいわゆる実効値の表示になりますが，スペクトルで観察していると基本波の2倍波3倍波の比率から，正弦波の美味しいところだけを消費しているようなところが見え，動作状況に応じて変化するのが楽しいです．

また，システムの裏側の電源ケーブルでどのプラグがどの装置につながっているかがぐちゃぐちゃになっていてわかりにくい場合，電源プラグと装置の近くの2カ所に取り付けて，電流スペクトルの特徴から接続先がわかるといった使い方ができます．

スペクトル変化をAIで学習するか，電流音を人間が聴くことで音色の変化による装置の故障予知に使えるかもしれません．

ソフトウェア

● BM1422AGMVの初期化設定

リスト1は，1 kHzの割り込み処理で3軸データを読み出してシリアル出力する基本動作のサンプル・コードです．

BM1422AGMVの初期設定は43行目からで，CNTL1（Control setting1）レジスタ（0x1B）に0xDAを書き込

リスト1　BM1422AGMVの初期化とデータ取得プログラム
BM1422AGMVの初期化と3軸地磁気データのシリアル出力．セマフォを使った1kHzサンプリング

```
#include <Arduino.h>                                    // Arduino 基本API
#include <Wire.h>                                       // I2C 通信
#include "freertos/FreeRTOS.h"                          // FreeRTOS 基本
#include "freertos/semphr.h"                            // FreeRTOS セマフォ
void i2c_write(uint8_t reg, uint8_t val){
  Wire.beginTransmission(0x0E);                         // I2C 0x0Eへ
  Wire.write(reg); Wire.write(val);                     // データ書き込み
  Wire.endTransmission();
}
void i2c_read(uint8_t reg, uint8_t *d ){
  Wire.beginTransmission(0x0E);                         // I2C 0x0Eから
  Wire.write(reg); Wire.endTransmission(false);
  Wire.requestFrom(0x0E, 6);                            // 6バイト読み取り
  for(uint8_t i=0;i<6;i++) d[i]=Wire.read();
}
SemaphoreHandle_t  sampleSem;                           // タスク通知用のバイナリ・セマフォ
hw_timer_t *timer=nullptr;                              // 1kHz ハードウェア・タイマ
void samplingTask(void*){                               // 1kHz サンプリング・タスク
  const float SENS_uT_PER_LSB=0.042f;                   // BM1422AGMV感度[uT/LSB]
  while(1){
    xSemaphoreTake(sampleSem, portMAX_DELAY);           // 1kHzごとに起床
    uint8_t xyz[6];                                     // データ格納用6バイト
    i2c_read(0x10,xyz);                                 // 磁気データ読み出し
    int16_t x=xyz[0]|(xyz[1]<<8);                       // データ変換
    int16_t y=xyz[2]|(xyz[3]<<8);
    int16_t z=xyz[4]|(xyz[5]<<8);
    i2c_write(0x1D,0x40);                               // 測定開始（次回用トリガ）
    double dx = (double)x * SENS_uT_PER_LSB;            // uTに変換
    double dy = (double)y * SENS_uT_PER_LSB;
    double dz = (double)z * SENS_uT_PER_LSB;
    Serial.printf("%f,%f,%f¥n",dx,dy,dz);               // シリアル出力
  }
}
void IRAM_ATTR onTimerISR(){                            // タイマ割り込み（1kHz）
  BaseType_t hp=pdFALSE;
  if(sampleSem) xSemaphoreGiveFromISR(sampleSem,&hp);   // セマフォ待ちで
  if(hp) portYIELD_FROM_ISR();                          // 高優先度(hp)タスクがあれば切替
}
void setup() {
  Serial.begin(921600);                                 // シリアル設定
  Wire.begin(); // I2C
  Wire.setClock(400000);                                // I2C clock 400kHz
  i2c_write(0x1B,0xDA);                                 // CTRL1: Active=1,14bit,Single
  delay(2);
  i2c_write(0x5D,0x00);                                 // CTRL4 Reset解除
  i2c_write(0x1C,0x0c);                                 // CTRL2:DRDY enable, DRDY activeH
  i2c_write(0x40,0x00);                                 // AVE_A:4回平均
  i2c_write(0x1D,0x40);                                 // CNTL3 測定開始
  sampleSem=xSemaphoreCreateBinary();                   // タイマ→タスク通知セマフォ
  timer=timerBegin(0,80,true);                          // タイマ0を ÷80で1MHz
  timerAttachInterrupt(timer,&onTimerISR,true);         // ISR登録（エッジ・インタラプト）
  timerAlarmWrite(timer,1000,true);                     // 1000カウントごと（1ms）に割り込み
  xTaskCreatePinnedToCore(samplingTask,"sampler",8192,nullptr,3,nullptr,1);
  timerAlarmEnable(timer);                              // タイマ開始 → サンプリング・スタート
}
void loop() {}                                          // メイン・ループは未使用（タスクとISRで駆動）
```

んでいます．各ビットの意味は以下の通りです．

ビット7 PC1＝1：電源ON（Active）にする
ビット6 OUT_BIT＝1：出力を14ビット・モードに設定
ビット5 RST_LV＝0：ロジック・リセット解除
ビット4～ビット3 ODR[1:0]＝11b：連続測定時の間隔＝1 kHz
ビット2＝0：予約ビット（0固定）
ビット1 FS1＝1：シングル測定モード（連続でなく単発）
ビット0＝0：予約ビット（0固定）

当初，センサの連続測定時の間隔＝1 kHzというモードを利用してサンプリングしてみたのですが，センサの内部発振にばらつきがあり，ビット1のFS＝1のシングル測定モードの単発測定にして，外部トリガに切り替えたという経緯があります．

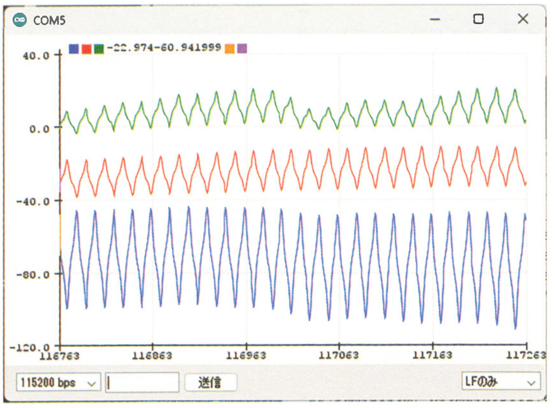


図5　リスト1を実行したときのArduino IDEのシリアル・プロッタ出力

アイソレーション・トランスに南向きで地磁気センサを近づけたときの出力(縦軸はμT)

45行目は，CNTL4レジスタ(0x5C/0x5D)に0x00を書き込んでいます．このレジスタはデータ内容に関わらず何かを書き込むとリセット解除ラインを立てる動作をします．それでMSB側にゼロを書き込んでいます．

46行目は，CNTL2(Control setting2)レジスタ(0x1C)に0x0Cを書き込んでいて，以下のビット設定になります．

ビット3 DREN＝1：DRDY出力を有効化
ビット2 DRP＝1：DRDYをアクティブ“H”に設定

これは動作の外部モニタ用の出力端子設定で，**写真3**のDataRDY出力が有効になります．この機能で，オシロスコープを使って次の内部アベレージング回数とサンプリング周期のタイミング余裕の確認ができます．

47行目は，AVE_A(Average time)レジスタ(0x40)に0x00を書き込んでいます．これが内部アベレージング回数の設定です．ビット4～ビット2(AVE_A[2:0])が000の場合はアベレージング回数が4回になります．8回に増やす(011を書き込む)とノイズ・フロアは下がるのですが，1 ms周期だとタイミング的にギリギリだったため，4回にしています．

48行目は，CNTL3(Control setting3)レジスタ(0x1D)に0x40を書き込んでいます．これはビット6(FORCE)＝1でA-D測定開始トリガで測定がスタートします．測定中に再度1を書いた場合は，一旦中断して再スタートします．

2台の磁気センサを並列動作させる場合に，このI^2Cのスタート・タイミングがずれて加算平均することが，ナイキスト周波数あたりから上のエイリアシング応答のゲインに影響しているようです．今のところ良い方法を思いつけないので，ばらけたタイミングでスタートさせています．

● サンプリング・タイミング

サンプリング・タイミングの1 kHzは，M5Stamp S3のタイマ割り込みを利用しています．49～54行目がタイマ設定です．80 MHzを80分周して1 MHzを作り，51行目と52行目で1 ms割り込みを発生させます．34～38行目が割り込み関数です．実際に1 ms周期の動作をしているのは18行目のサンプリング・タスクの21行目のセマフォ待ちのところです．

● BM1422AGMVからのデータ読み出し

リスト1の23～31行目が*XYZ*の磁気データの読み出しです．データは6バイト固定で読み込んで，2バイトごとに符号付き`int16_t`に変換し，1 LSBの0.042 μTをかけてシリアル出力しています．次のデータのサンプリングを，27行目のI^2C書き込みでスタートさせています．31行目のシリアル出力をArduino IDEのシリアル・プロッタで表示したものを**図5**に示します．

● 多ノード構成とPC側グラフ表示

図6は多ノード接続時の構成です．複数台の場合は，M5Stamp S3の無線LAN機能を使ってワイヤレス伝送をします．各ノード側で3軸の磁気データを1 kHzサンプルしたものが1024サンプルたまったら，FFT→PSD計算をします．無線LANの送信負荷を軽減するため，縦軸の浮動小数点データを1バイトに量子化してBase64で送っています．ソース・コードは，できるだけ短くしようとしたのですが190行のため，誌面には載せずにダウンロードができるようにします．

多ノード動作時の電源供給

● 2分岐ケーブル

写真10は，Amazonで購入した電源専用2分岐ケーブルです．コネクタ形状はUSB Type-Cですが，内部配線は5 Vと0 Vの2本しかつながっていません．USB PDなどにはいっさい対応していないので，使用するにはType A-C変換コネクタが必要になります．

この商品のレビュー欄にはUSB-PD系の充電に使えると勘違いした方の怒りの★1つのレビューも見かけましたが，M5StackやM5Stamp，ArduinoのUSB Type-Cタイプ電源を使う者にとっては複数台に電源を供給するのにとても便利なケーブルです．

● 多ノードへの電源供給ケーブルの抵抗値

磁気センサを16台運用するにあたり，**図7**のようにクリスマス・ツリーのランプのような感じでつなげてケーブルごと巻いておけば，現場でセンサを展開配置するのも楽だろうと思いました．が，すぐに私のゴ

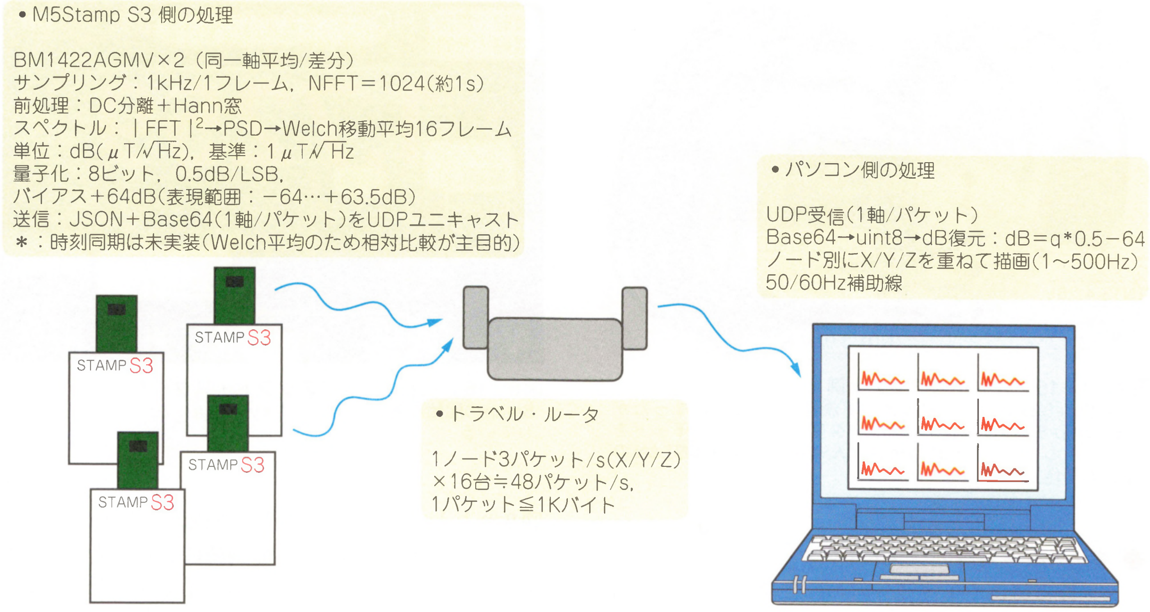


図6　多ノード対応のシステム構成
ノード側(M5Stamp S3)でほとんどの処理をして，パソコン側は表示するだけ

ーストが「ケーブルの抵抗値的に無理じゃない？」と囁やきました．

どこまでいけるかわからなかったので，根拠を概算してみたのが**図7**です．各ノードは起動後に110 mA程度の電流を消費するとして，2分岐電源ケーブルの片側の5 Vと0 Vのパスの合計の抵抗を70 mΩとすると，上流から6台目で4 Vを下回ることがわかりました．

● 電源電圧3.04 Vで動いていた

ダメそうな試算が出たからやらないというのも面白くないので，実際にやってみたのが**写真11**です．ケーブルのDC抵抗は130 m～160 mΩのばらつきがありましたが，供給電圧はおおむね**図7**と同じになりました．

しかし，この電圧供給状態でパソコン側の磁気スペクトル表示を確認すると，なんとN01以外のノードからFFT結果が無線LANで送られてきていました．N07ノードより下流は3.3 V以下で，M5Stamp S3のDC-DCコンバータはダイレクト・モードに切り替わっていて，1次側の電圧がほぼそのままCPU電圧になっているのに動作していました．

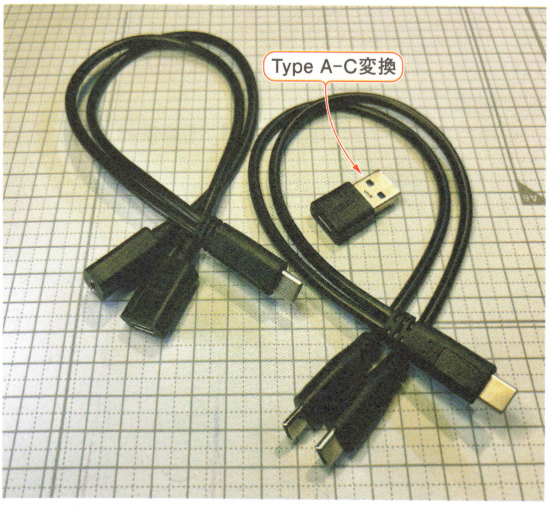


写真10　5 V専用電源2分岐ケーブル
USB Type-Cコネクタだが，5 Vと0 Vの2本の線しか接続されていないケーブル．複数のM5Stamp/M5Stackに5 V供給する場合に便利

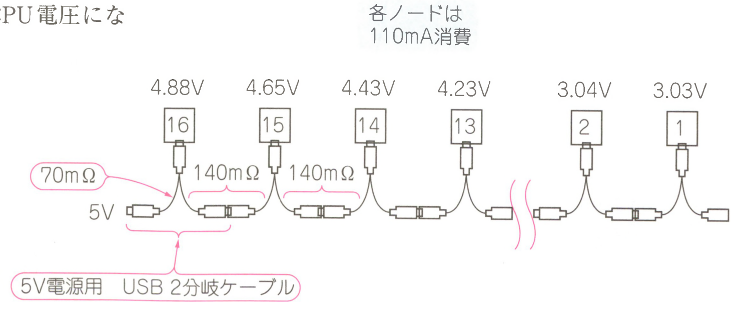


図7　16ノード給電のダメな例
30 cmのUSB 5 V電源専用2分岐ケーブル(130 m～160 mΩ)を16本使って上流のN16からまっすぐ接続すると，N07より下流は3.3 V以下になる

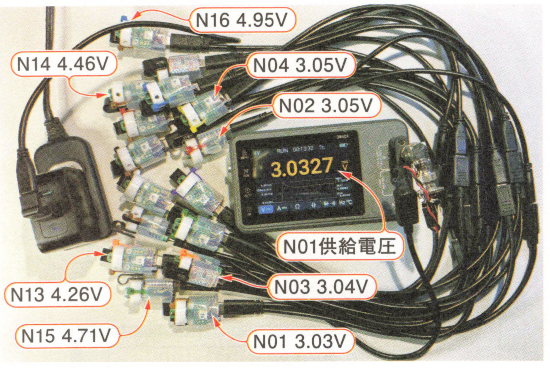


写真11　16ノード給電のダメな例
N16側から給電して，N06より下流は3.3 V以下になったがM5Stamp S3のDC-DCコンバータはダイレクト・モードをサポートしていて，N01以外はなんとか起動して無線LANの送信も動作

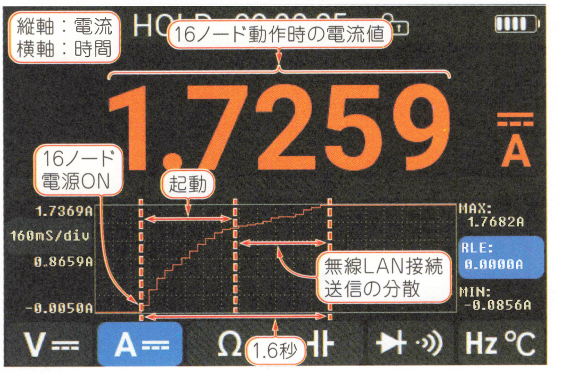


図8　16ノード・アレイのソフト・スタート
Setupの開始を各ノードで`delay(node_id * 50)`でずらしている

● 多ノード運用時のソフト・スタート

ダメな接続例で下流側も起動に成功した1つの理由の可能性として，図8のような分散ソフト・スタートを実装していたことが考えられます．これは`Setup`関数の最初に`delay(node_id * 50)`の実行で，ノード番号×50 msの遅延をするという動作です．これにより，ノード番号が小さい下流のノードが先に処理を開始します．

単純なものですが，16台同時に電源供給したときに，図8のように1.6秒かけて消費電流が立ち上がるようにしてあります(無線LANの接続にも時間差ができるので，データ・パケットの送信タイミングをずらすという効果もねらっている)．

● スイッチング・レギュレータのダイレクト・モード

しかし，いったんスイッチング・レギュレータが起動して3.3 Vを供給開始してから，1次側電圧が降下してスイッチング・レギュレータがダイレクト・モードに遷移する際に，2次側の電圧の落ち込みがなくスム

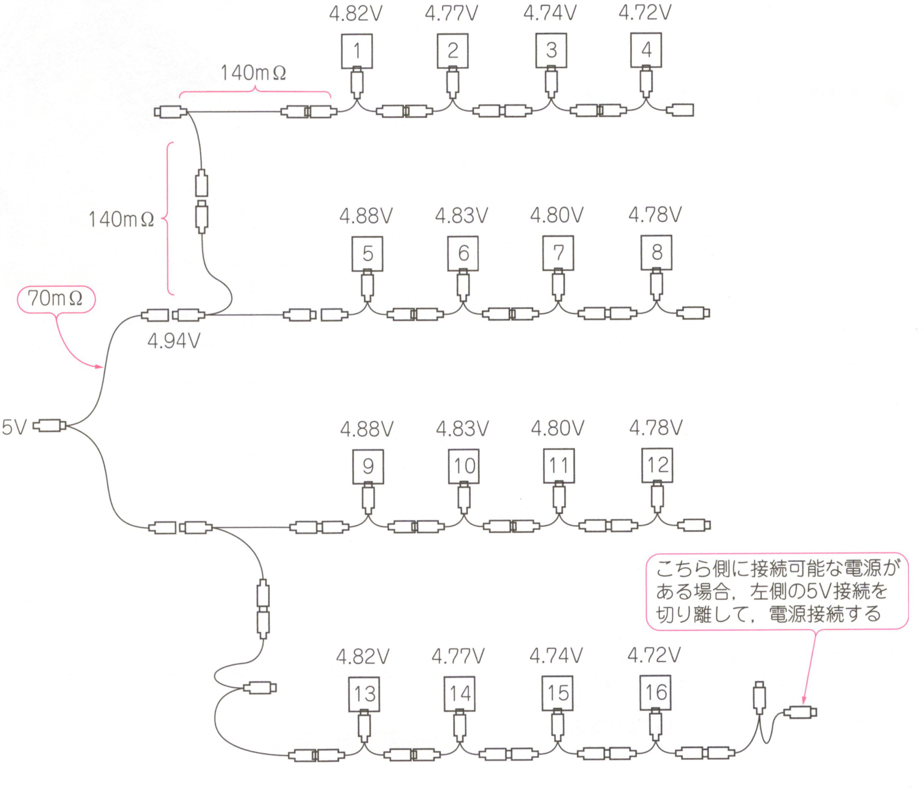


図9　4×4の50 cmグリッド時の電源接続
4ノードを1単位として可能な場合は別々に5 Vを供給する

コラム　電流は流れる…グラウンド記号を描かずに回路図を引けますか？

● グラウンドに流れる電流

- グラウンド・ループに気を付けましょう
- グラウンドを強化しましょう
- 1点アースにしましょう
- それでもだめならグラウンドをカットしましょう

こうしたグラウンドに関する漠然としたノウハウも，回路に流れる電流や鎖交する磁界を把握することで見え方が変わってきます．

グラウンドを安心で静かなゼロ・ボルトの場所と考えるのではなく，他の回路と同様に電流が流れる導体の一部として扱うことが重要です．例えば，雨が降れば水位が上がり，風が吹けば波が立つ川のように，グラウンドも電流によって電位が揺れます．10 mΩのグラウンドに1 mAの電流が流れれば，10 μVの電圧が生じます．

回路図でグラウンド記号を描くと，ついそこで電圧が完全にゼロになるように考えてしまいがちですが，グラウンドに流れ込む電流・湧き出る電流がどこから来るか，その結果どう電位が揺れるかを心に留めておくことも大切です．電流の流れを意識するために，あえてグラウンド記号を描かずに回路図を引いてみるのも1つの方法です．

● 差動線路や電源線に流れる同相電流

差動線路や交流電源線には，同相電流(コモンモード電流)も流れています．低周波領域では，電動機やトランスからの漏電電流が主な要因です．理想的にはこれらの漏れ電流は保安接地線を通って電力供給側へ戻りますが，保安接地線はゼロΩではないため，電源線にも残留し，一部は制御線や他機器のグラウンドに紛れ込んで還流します．100 MHz以下では，スイッチング電源が電力源となり，フィルタでグラウンド側に振り分けられなかった成分が電源線に同相電流として流れます．

100 MHz以上では，無線電波の鎖交が支配的になります．近くに送信所やアクセス・ポイントがある場合は注意が必要です．とくに710～960 MHz帯の携帯電話のディジタル変調波は，送信機が室内に多数存在する可能性が高く，その断続的な波形が差動レシーバを非線形通過することで，20 Hz～1 kHz程度の可聴帯域ノイズとして混入することがあります．差動線路をシールド線で囲み，そのシールドを筐体に接続すると，主な電流経路を筐体側に移せます．

〈鮫島 正裕〉

ーズにダイレクト・モードに移行する必要があります．

この点には興味がありましたが，今回は基本的に安定した電源を使用する想定なので，バッテリ駆動などでの電圧低下時や，ゆっくり電圧が上昇するときの挙動は確認しませんでした．M5Stamp S3Aでは，電源回路がS3から変更されているため，電圧降下に対する挙動が異なるかもしれません．

● 4ノード単位の運用

図9に4ノード単位としたときの電源接続図を示します．4×4のグリッドに配置する場合，4台ずつ取り出して設置します．また，図の右側に利用可能な電源がある場合，柔軟な電源接続が可能です．繰り返しになりますが，このUSB Type-Cコネクタ2分岐ケーブルは見た目が怪しいですが，多ノード動作のときにあるととても便利です．

まとめ

今まで低周波磁気ノイズ確認の際に，ハンディ型の磁気センサやオシロスコープとプローブを持って，あたりをうろうろ歩き回って記録していたのですが，地磁気センサ・アレイで同時多点観測ができるようになりました．なにより歩き回る必要がなくなり，**図2**のような周波数表示で各部の漏洩磁束の状況を俯瞰して眺めることができるようになったのがありがたいです．

また，当初ノイズ・フロアを3 dB下げるために始めた地磁気センサの並列平均化ですが，2台の差分を計算することで**写真8**のようなグラディオメータとして利用できそうなことがわかりました．これもZ軸とY軸のベクトル情報が手にはいるので，センサの位置の工夫とともに結構おもしろそうな気がしています．

なにより電流のスペクトル情報が得られるので，正弦波からの電力消費の特徴がわかり，電源線がぐちゃぐちゃになっているときにどの線がどこにつながっているかとか，このコンセント抜いてよいかどうかなどの判断に使えそうです．

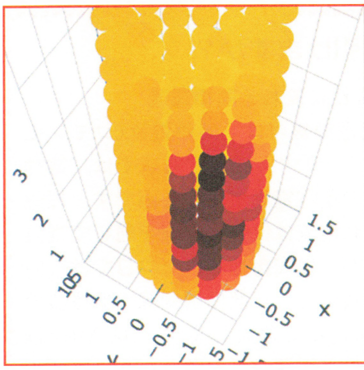
◆参考文献◆

(1) 鮫島 正裕；電車もハイブリッド車も…街中を探検！ 磁界ノイズ発見器の製作，トラ技ジュニア，2016年夏号，CQ出版社．
https://www.youtube.com/watch?v=Sh5t0k6WqoI

(2) 鮫島 正裕；半導体の生1/fノイズの音色！ トランジスタン・ドリームの製作，トランジスタ技術，2024年4月号，CQ出版社．

(3) 鮫島 正裕；50 A・5 nsハイ・パワーのパルス生成と観測プローブの製作，トランジスタ技術，2021年9月号，CQ出版社．

下記リンクにて関連データ公開中です.
https://toragi.cqpub.co.jp/download2026/



第2章 ラズパイPico 2W×温度センサで広がる計測制御の可能性!

まるでMyカミオカンデ!

16×16アレイ! 3D温度分布センサの製作

田口 海詩 Uta Taguchi

センサをアレイ化することで，単一のセンサだけでは得られない空間的な情報を得られるようになります．また，複数のセンサを一定の間隔で配置し，それぞれのセンサから得られるデータを解析することで，測定対象の周辺状況やその変化のようすを詳細に把握できるようになります．そこで本稿では温度センサを並べて3D空間の温度分布を測れるようにします(**写真1**).

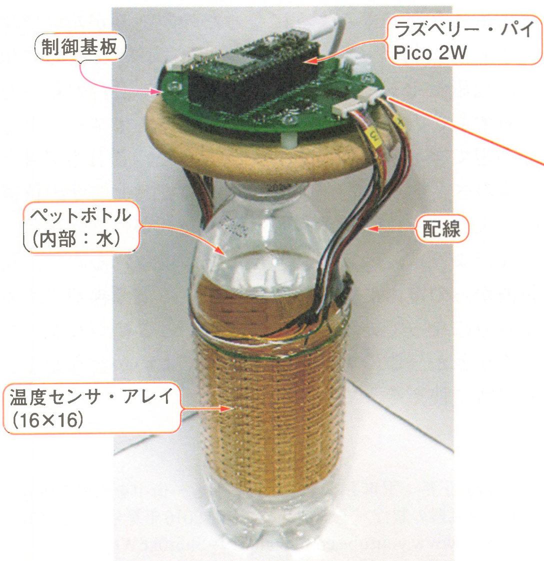
温度センサを複数用いてアレイ構造にすることで，単一センサでは把握できない空間の温度差を検出します．これは，人間の目や耳が左右に配置されて，異なる信号を受け取ることで空間的な情報を認識する仕組みに似ています(**図1**)．このような温度センサ・アレイを用いることにより空間の温度分布を高精度に可視化できるようになり，熱の流れの状態など新たな情報を取得することが可能になります．これは，電子機器の発熱箇所の特定や冷却効率の評価などに欠かせない技術です．

例えば，風が温度センサ・アレイに当たることで生じる温度差を利用すれば，風向や風速を非接触で推定することができるようになります．温度センサのアレイ化は，空間的な温度変化を捉えることで環境の状態や異常を詳細に把握できる技術です．またこの技術は微風環境下での体感温度や不快指数のセンシングにも有効な手段です．

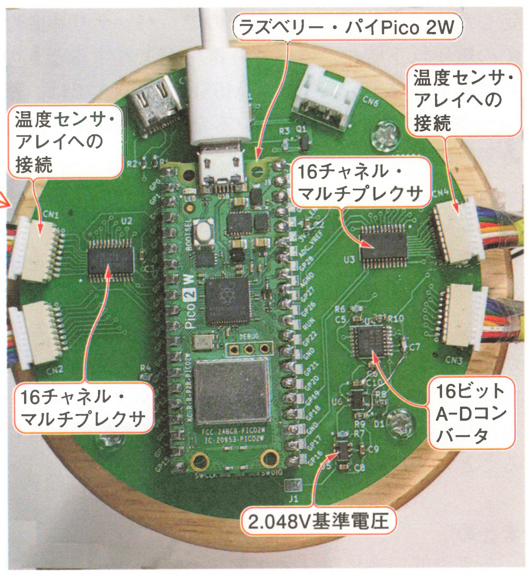
温度センサ・アレイを用いた測定システム

● 周囲温度状況センサのシステム構成

今回製作する温度センサ・アレイは，NTC(Negative Temperature Coefficient，可変負の温度係数；温度が上昇すると抵抗値が下がる)温度サーミスタを複数



(a) システムの全体



(b) 制御基板

写真1　水が入ったペットボトルの胴体部分に温度センサ・アレイを設置し3D空間の温度分布を計測する
ペットボトル表面に温度センサ・アレイのフレキシブル基板を貼り付ける．制御基板をペットボトルの上に配置し，温度センサ・アレイとの間で配線する．ペットボトルの水温を計測することで，立体的な温度分布を計測する

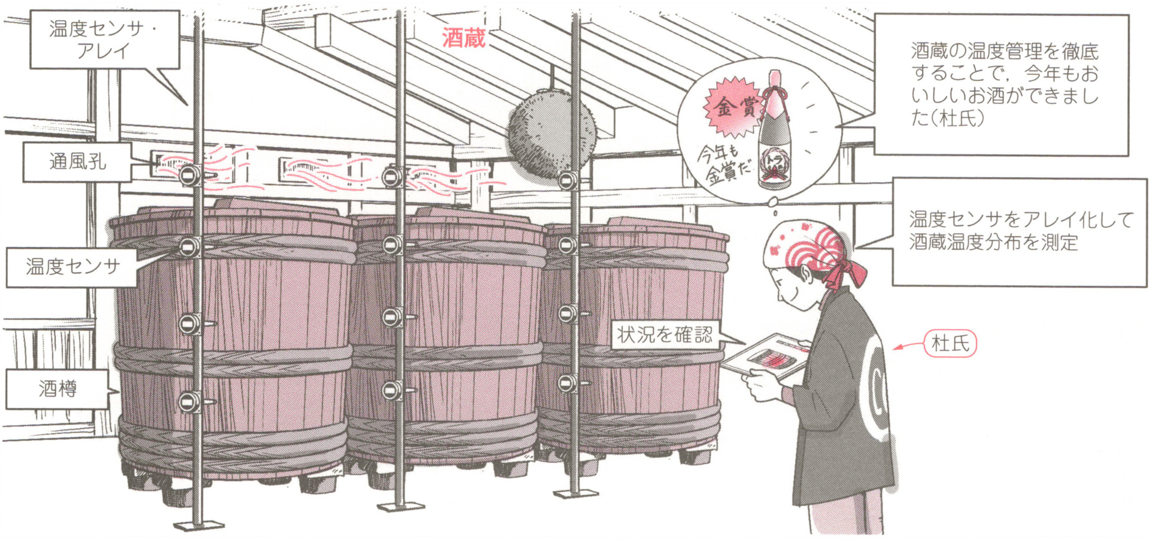


図1　センサをアレイ化すると単なる値だけじゃなくて空間分布を計測できる
酒蔵での温度管理は，日本酒の品質を左右する極めて重要な要素．近年では，多数の温度センサを設置し，微細な環境変化にも細心の注意を払いながら，最高の酒造りが行われている

用いて製作します．NTC温度サーミスタのアレイ化には，空間認識，異常検知，制御精度の向上，動的解析といった多くの利点があり，温度センシング技術の可能性を大きく広げる手法として，さまざまな分野での活用が期待されます．

図2に，今回製作する温度センサ・アレイのシステム構成を示します．温度センサには，100 kΩ(@25 ℃)のNTCサーミスタを256個(縦16列×横16列)使用しアレイ構造に配置します．各NTCサーミスタの測定には16チャネルのマルチプレクサを2個使用し，順次スイッチを切り替えながら，それぞれの抵抗値を測定していきます．

NTCサーミスタ抵抗値の測定制御には，ラズベリー・パイ Pico 2 W(以下Pico 2W)を使用しMicroPythonでプログラミングします．Pico 2WにはWi-Fi機能が搭載されているので，Wi-Fiルータを介してパソコンと接続できます．今回はPico 2WをWebサーバとして動作させ，パソコンからはMicrosoft Edgeなどの一般的なWebブラウザを用いてアクセスできるようにします．このような構成にすることで，パソコン側では専用アプリケーションを開発する必要はなく，Webブラウザのみで温度センサ・アレイの制御や測定を行えます．

一見すると複雑に見えるシステムでも，システムを分解してみれば単純な単機能の集まりにすぎません．単機能の要素を組み合わせて連携させて動かすことで，複雑に見える装置ができてしまいます．

システムを機能別要素技術に分解すると，

①センサ・アレイによる情報読み出し構造
②Webサーバ構築
③測定データの可視化処理

の3つになります．

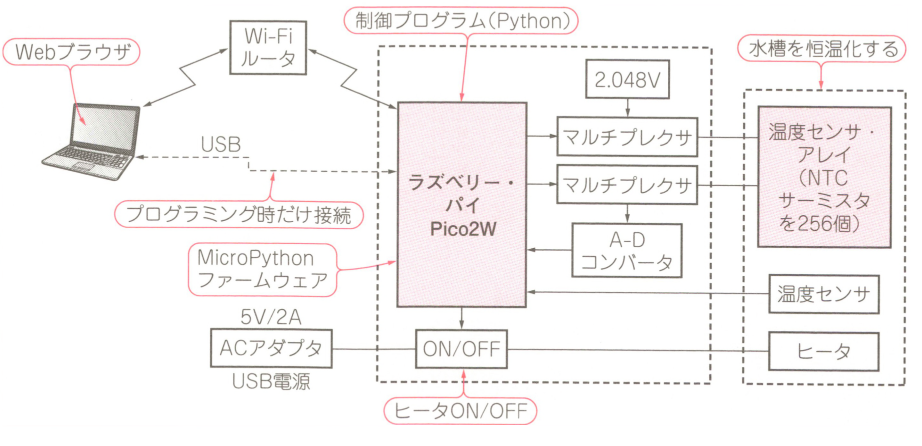


図2　温度センサ・アレイ・システム構成
256個のNTC温度センサを，2個の16チャネル・マルチプレクサで切り替えながら，A-Dコンバータを用いてアナログ電圧を測定する．ラズベリー・パイPico 2WをWebサーバとして稼働することで，測定した温度データをパソコンのWebブラウザで表示できる

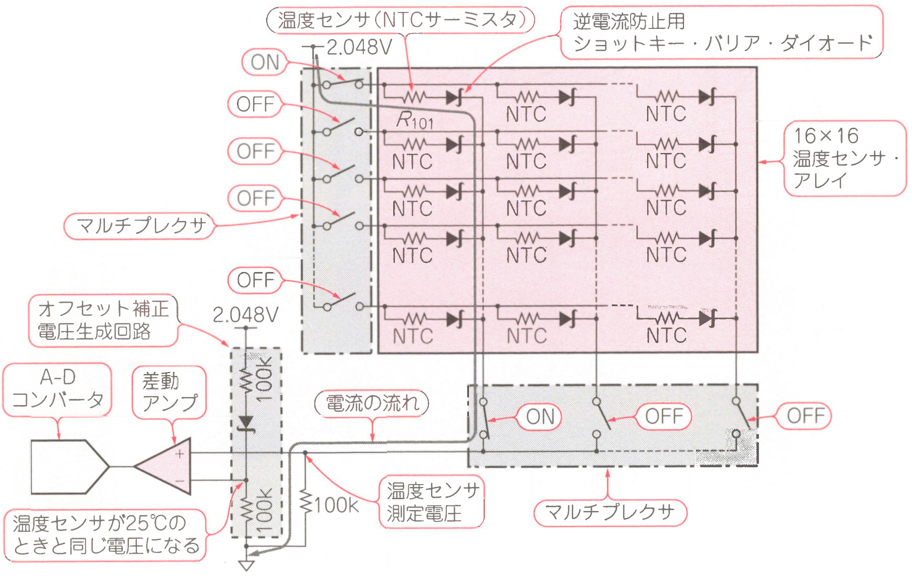


図3　温度測定方法
NTC温度サーミスタを16×16の格子状に配置し，縦軸と横軸それぞれに配線することで，マトリクス構成を実現する．NTCサーミスタには極性がなくどちらの方向にも電流が流れるため，逆電流防止用のダイオードを各サーミスタごとに入れる必要がある

完成した温度センサ・アレイの外観を**写真1**に示します．以下に，それぞれの要素技術について説明します．

温度センサを並べる…要素技術の検討

● 温度センサ・アレイの情報読み出し構造

温度センサには温度が上昇すると抵抗値が減少する特性をもつ100 kΩ(@25 ℃)のNTCサーミスタを用います．NTCサーミスタの抵抗値は基準抵抗との分圧回路によって測定する方法が一般的です．今回，**図3**に示すようにアレイ化したサーミスタ抵抗値を縦と横に配置した2つのマルチプレクサ(MUX)を時分割で切り替えながら測定していきます．

NTC温度サーミスタを16×16の格子状に配置し，縦軸と横軸のそれぞれに配線することで，マトリクス構成を実現できます．各温度センサの切り替えには，マルチプレクサを用いて各サーミスタの抵抗値を効率的に読み出します．縦位置(行)と横位置(列)の選択によって個別のサーミスタにアクセスできるため，配線の簡素化とスキャン速度の向上が図れます．

ただし，この方式はサーミスタに逆電流が流れないように，一緒にダイオードを挿入する必要があります．挿入するダイオードについては温度測定の誤差となりますので，なるべく順方向電圧V_Fの小さいショットキー・バリア・ダイオードを用います．また，電圧測定に使うA-Dコンバータの入力部は差動入力となっていますので，25 ℃時の電圧発生回路をマイナス入力に接続してオフセット電圧の除去を行います．

温度センサ・アレイは**図4**と**写真2**に示す64個(縦16列×横4列)のマトリクス回路をフレキシブル基板で作ります．フレキシブル基板を用いることで円柱などの曲がった形状に配置できます．このフレキシブル基板を4枚用いることで256個(縦16列×横16列)構造のセンサ・アレイを実現します．

温度測定にはA-D変換レートが1 kサンプル/sの16ビット分解能ΔΣデルタ・シグマ型A-DコンバータのADS1119(テキサス・インスツルメンツ)を用います．温度センサの数が256個もあるので，ΔΣ型で変換レートが比較的速いA-Dコンバータを選定しました．ADS1119はI^2Cインターフェースを用いてデ

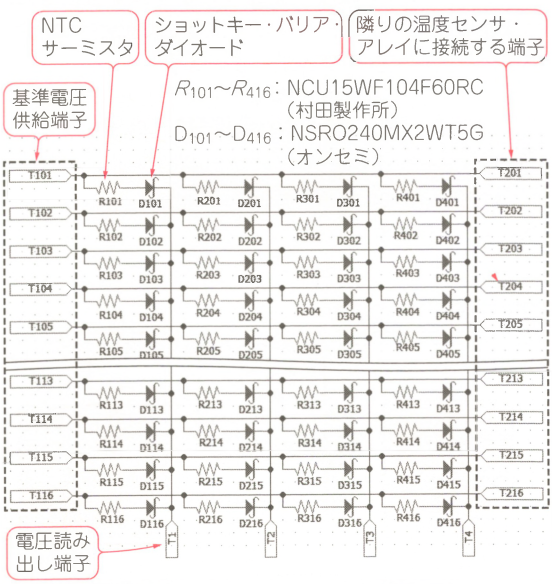


図4　1/4の温度センサ・アレイ(16×4)**回路**
基板は16×4温度センサの形状で設計し，この基板を4枚用いて16×16の温度センサ・アレイにする．温度センサには100 kΩ(@25 ℃)のNTCサーミスタを用い，逆電流防止用のショットキー・バリア・ダイオードを各NTCサーミスタと一緒に実装する

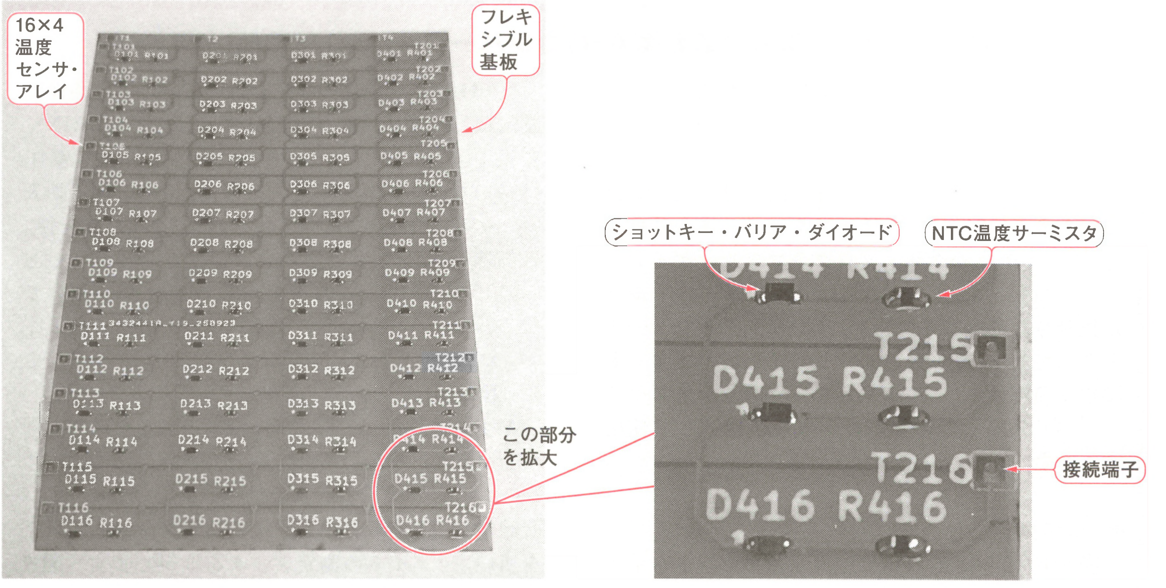


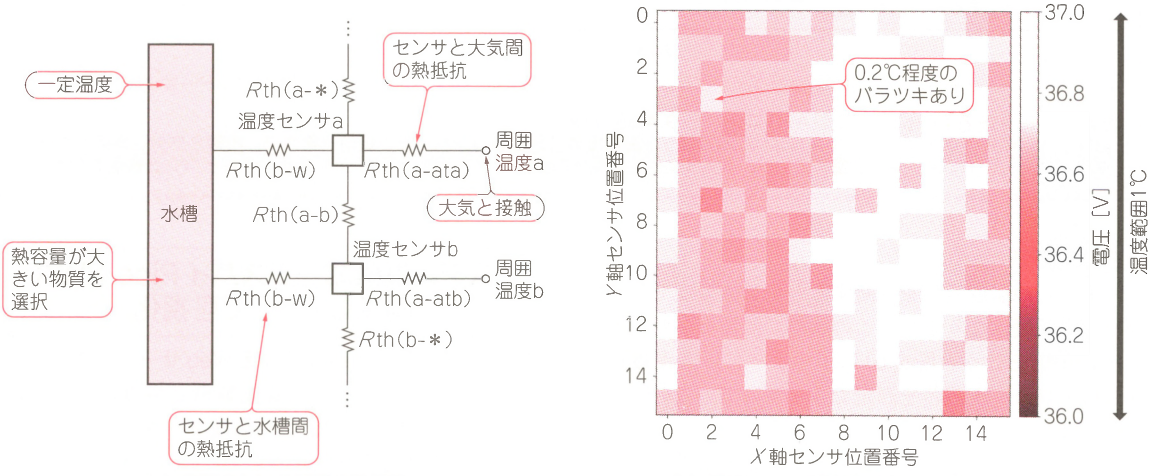
写真2　全体の1/4の温度センサ・アレイ(16×4)
温度センサ・アレイを構成するプリント基板は円柱状物体に巻き付けて配置するため，フレキシブル基板で製作する

バイスの制御と測定データ読み込みを行います．Pico 2Wを用いMicroPythonでプログラミングすることでICの制御を行えます(コラム1を参照)．

● センサ・アレイのバラツキ補正

センサをアレイ化したときにセンサ素子ごとの特性バラツキによる誤差が問題となることがあります．同種類のセンサをたくさん並べるとバラツキが顕著に目立つようになります．今回製作した温度センサ・アレイは，NTCサーミスタの抵抗値精度，ダイオードの順方向電圧，マルチプレクサのオン抵抗などが測定誤差に影響を与えます．特に，測定温度のオフセット電圧は何もしない状態で目立ちますので，ゼロ点補正を行う方法については考えておく必要があります．

温度センサ・アレイを温度が一定に保たれている水が入ったペットボトルの周りに巻き付ける構造にしています．水の熱容量は比較的大きいため通常は一定温度に保たれ，外側から熱の流入があったときにセンサ温度が変化する仕組みとなっています．各センサ周辺の熱回路は図5(a)に示す通り，センサの周りには水槽，隣のセンサ，大気との熱抵抗が存在します．センサごとの各熱抵抗がなるべく均一に保たれる設計する



(a) 各温度センサ周囲の熱抵抗

(b) 温度センサ256個のばらつき測定(16×16)

図5　各温度センサの特性バラツキ
複数のセンサをアレイ化する場合にセンサ特性のバラツキが気になる．特にオフセット・バラツキは無信号状態でよく目立つので補正が必要になる場合がある

コラム1　16ビット&1 kSpsのΔΣ型A-DコンバータADS1119の使い方

● ΔΣ型A-DコンバータADS1119の特徴

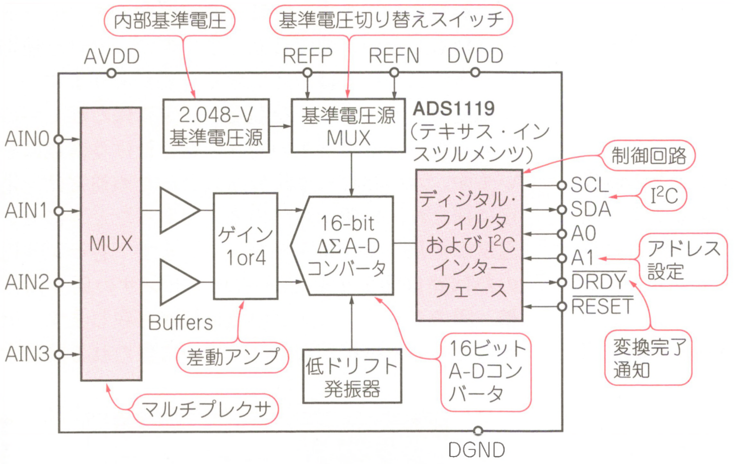
ADS1119(テキサス・インスツルメンツ)は16ビット高精度ΔΣ型A-Dコンバータで，最大1 kサンプル/sの変換レートでデータ収集できます．**図A(a)**に示すように内部には4チャネル(2チャネル差動入力)のマルチプレクサ，プログラマブル・ゲイン・アンプ(1倍・4倍)，50/60 Hzノイズ除去フィルタが搭載されています．また，I²Cインターフェースを介してIC制御や測定データ転送を行います．電源電圧範囲は2.3 V～5.5 Vとなっており，ラズベリー・パイPicoなどのマイコンと直接接続して使用できます．

● ADS1119の使い方

図A(b)に今回IC制御に使用するコマンドを示します．使用方法の手順としては，電源投入後にRESET命令(`0x0b`)で初期化し，WREG命令(`0x40`)で測定条件の設定を行います．測定条件の設定項目は使用チャネル(MUX)，ゲイン(GAIN)，変換レート(DR)，変換モード(CM)，基準電圧(V_{REF})などがあります．例えばAIN0-AIN1差動入力，ゲイン1倍，1 kサンプル/s，シングル変換，外部基準電圧を用いる場合，設定データは`0x0d` (`0000 1101`)となります．MicroPythonを用いて，`i2c.writeto_mem(ADS1119_ADDR, 0x40, b'¥x0d')`のコードでレジスタに書き込みできます［**図B(a)**］.

A-D変換開始はSTART命令(`0x08`)を送ります．MicroPythonを用いると，`i2c.writeto(ADS1119_ADDR, b'¥x08')`のコードを用います．

測定データを収集するにはRDATA命令(`0x10`)を用いて2バイトの測定データを取得します［**図B(b)**］．MicroPythonを用いると，`i2c.writeto(ADS1119_ADDR, b'¥x10')`と`i2c.read`



(a) ADS1119ブロックダイヤグラム

命令名	動作内容	コマンド
RESET	デバイスのリセット	0000 011x
START	A-D変換開始	0000 100x
RDATA	測定データの読み出し	0001 xxxx
WREG	測定条件の書き込み	0100 00xx

x：0でも1でも構わない

(b) 制御コマンド一覧 (I²Cで制御)

図A　16ビット&1 kSpsのΔΣ型A-DコンバータADS1119[3]

ADS1119(テキサス・インスツルメンツ)は、16ビット高精度のΔΣ A-Dコンバータ．低消費電力で、内蔵リファレンスやプログラマブル・ゲイン・アンプを備えており，最大1 kサンプル/sの変換レートで動作する．I²Cを用いてマイコンと通信を行う

ことが重要です．

外側からの温度変化を遮断すると全ての温度センサが一定の温度になります．この状態で温度センサ・アレイの測定を行うと**図5(b)**に示すように，各温度センサのオフセット誤差を測定できますので，このデータを記録してバラツキ補正のデータにします．

ペットボトルの水を**写真3**に示す市販の水槽ヒータを用いて温度制御することで各温度センサの校正を行うことも可能となります．

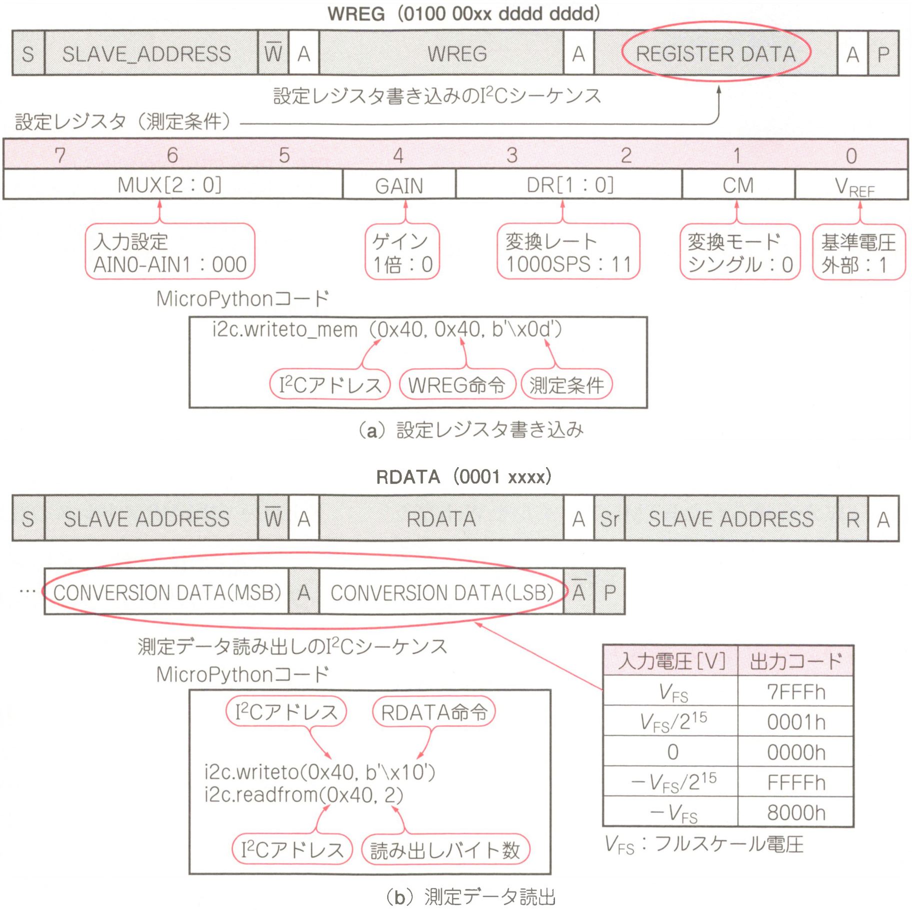
システムの構成…ラズパイPico 2Wで制御してPCで可視化

● 制御用ラズパイPico 2WをWebサーバにする

温度センサ・アレイは装置制御と温度測定にPico 2Wを使用します．測定した温度データはパソコンに転送して可視化処理を行います．Pico 2WにはWi-Fi機能があるので，Webサーバとして動作させ，パソコンからWebブラウザでアクセスできるようにします．Pico 2W側のプログラムにはMicroPythonを用います．

from(ADS1119_ADDR, 2)の2つのコードを実行すると，データ読み出しが行えます．測定開始してからA-Dコンバータ変換が終了するまでの間，待機してから測定データを読み出す必要があります．また，DRDY端子を利用すると変換完了を知ることができますので，この信号をトリガとして測定結果を取得できます．

〈田口 海詩〉



入力電圧[V]	出力コード
V_{FS}	7FFFh
$V_{FS}/2^{15}$	0001h
0	0000h
$-V_{FS}/2^{15}$	FFFFh
$-V_{FS}$	8000h

図B　ADS1119のレジスタ制御(3)
ADS1119の制御は，I²C通信を用いて測定条件の設定や測定データの読み出しを行う．MicroPythonのI²C制御メソッドを使用して，プログラミングできる

MicroPythonはソケット通信機能ライブラリが標準で備わっているので数行程度のコードで簡易的なWebサーバを構築できます．プログラムでは，HTTP通信のほか，測定データの取得やデータ変換などを行っています．パソコンに送るHTMLファイルはPico 2Wのフラッシュ・メモリ上に格納しておきます．

図6にPico 2WをWebサーバとした測定システムを構築したときの動作を示します．パソコンでWebブラウザを起動し，Pico 2WのIPアドレスをアドレス・バーに入力し，HTTPリクエスト送信(**図6の①**)をPico 2Wに対して行います．Pico 2WではパソコンからのHTTPリクエストを受けて，HTTPレスポンス(**図6の②**)をパソコンに返信します．

パソコンに返信するHTMLファイルには，測定開始ボタンや温度センサ・アレイ測定データを可視化する内容を記述しておきます．温度測定データを3D表示する，Plotly.js(JavaScript)を利用するスクリプトが含まれています．このスクリプトに従ってパソコンは一度だけPlotly.jsのContent Delivery Network(以下CDN)にHTTPリクエストを発信(**図6の③**)します．

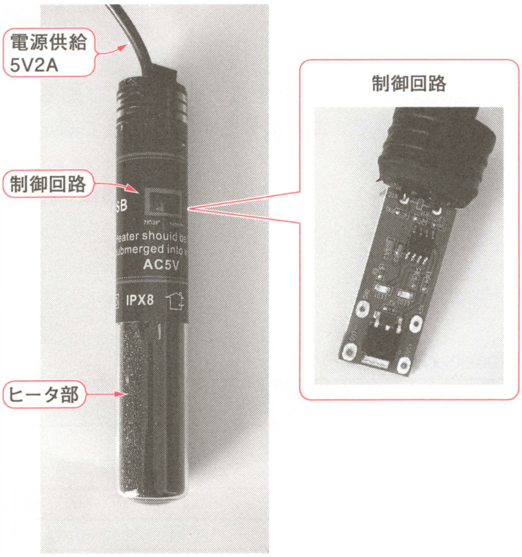


写真3　ペットボトルの温度制御ヒータ
熱帯魚を飼育する水槽の温度を一定に保つための水槽用ヒータが市販されている．これを用いて，ペットボトルの水の温度を一定に保つ仕組みを作る

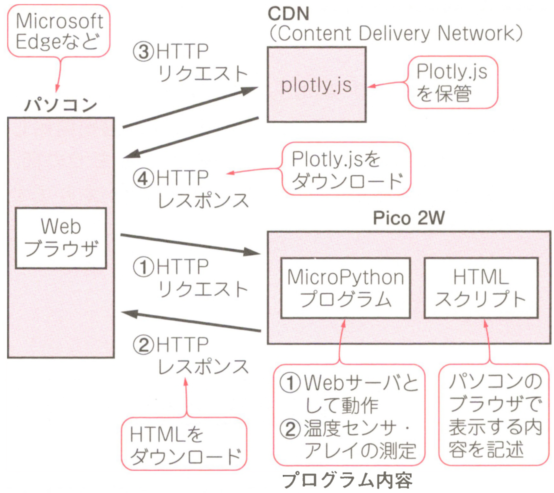


図6　Pico 2WのWebサーバ
Pico 2WのWebサーバにアクセスすると，Pico 2Wに格納されたHTMLファイルがブラウザに読み込まれる．HTMLにはJavaScriptライブラリplotly.jsの使用が記述されており，CDN経由でライブラリが自動的に読み込まれる

CDNからのHTTPレスポンス(**図6の④**)でPlotly.jsライブラリのダウンロードが行われます．Plotly.jsライブラリをパソコン上にキャッシュすることで，温度測定データを受け取ったらすぐ可視化できる仕組みが整います．

Pico 2Wから送られたHTMLファイルをWebブラウザに表示すると，測定開始ボタン(START)が表示されます．このSTARTボタンを押すとパソコンから再度HTTPリクエスト(**図6の①**)をPico 2Wに向けて発信します．このとき，発信するHTTPリクエストには/dataパスが追加されGETメソッドが用いられます．

Pico 2Wは/dataパスが追加されたHTTPリクエストを受け取ると，温度センサ・アレイ測定を実行し，測定結果データをJSON形式にしてHTTPレスポンス(**図6の②**)としてパソコンに返信します．パソコン側のWebブラウザでは，受信したJSON形式データをPlotly.jsライブラリを用いて可視化処理します．

固定IPアドレスの設定

Webブラウザを用いてPico 2WのWebサーバにアクセスするとき，Pico 2WのIPアドレスを知っていることが前提となります．IPアドレスはWi-Fiルータと接続するときに，DHCP(動的割り当て)機能によって自動的に設定されます．そのため，Wi-Fi接続状況よっては接続のたびに異なるIPアドレスが割り振られる可能性があります．

パソコンとPico 2WをUSB接続しThonnyでプログラム開発するとき，パソコン上でIPアドレスの確認は簡単です．しかし，Pico 2Wにプログラムを書き込みマイコン単体で稼働させる場合には，動的に割り当てたIPアドレスを確認するには，別途表示デバイスなどが必要となります．マイコン単体でWebサーバを稼働させる場合には，`wlan.ifconfig((STATIC_IP, SUBNET_MASK, GATEWAY, DNS))`メソッドを用いて固定IPアドレスの設定を行います．

温度センサ・アレイ・データを グラフィカルにかっこよく可視化するには

可視化ライブラリPlotly

温度センサ・アレイは測定点が256ポイントもあるので，測定データから意味ある情報を抽出するためにはデータ可視化が必須です．Pythonを用いてプログラム開発を行う場合，Matplotlibが可視化ライブラリとしては有名です．一方，測定データを3D表示しズームや回転などインタラクティブに操作を行いながら可視化データをあらゆる方向から確認したい場合にはPlotlyが有効です．特に，PlotlyはJavaScriptライブラリとしてPlotly.jsを提供しているので，Webブラウザ上でインタラクティブに測定データを確認したい場合にはメリットがあります．

JavaScriptライブラリを用いることで，HTMLスクリプトで記述をしてWebブラウザに表示するデータ可視化プログラムを簡単に構築できます．**図7**にPlotly.jsを用いて可視化した表示例[4]を示します．Plotlyを用いたプログラミングは一見難しそうですが，利用事例が豊富にあり生成AIを用いればプログラムを自動生成できます．パソコンのWebブラウザに表示する温度センサ・アレイの測定プログラムはPlotly.

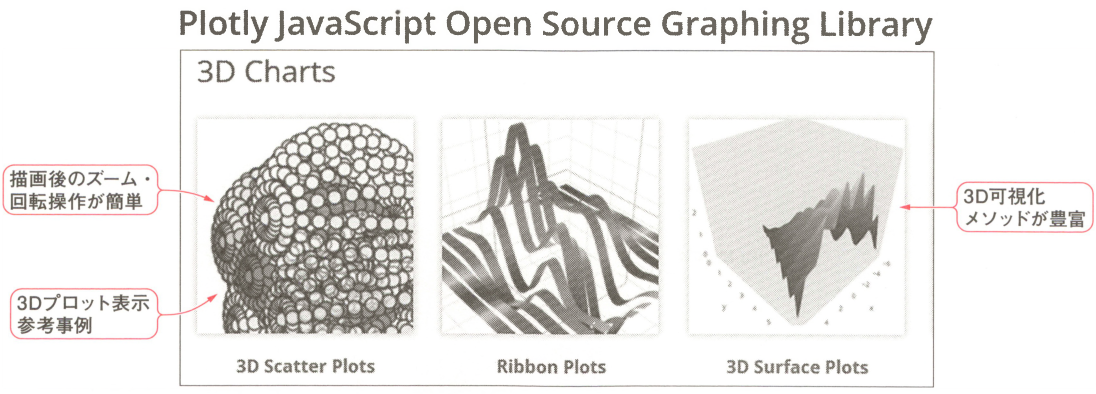


図7　可視化処理のためのJavaScriptライブラリPlotly
Plotlyはグラフ描画後にズーム・回転・パンなどのマウス操作や，各ポイントの座標・ラベルの確認といったインタラクティブ機能を備えている．Plotly.js(JavaScriptライブラリ)を使用することで，HTML上でPlotlyの機能を動作させることができる(4)

js（JavaScriptライブラリ）を用いてHTMLスクリプトで作成します．

● 円柱温度センサ・アレイの可視化

今回製作する温度センサ・アレイは図8に示すように円柱表面にセンサを配置する形です．円柱表面にセンサを配置したときの座標(x，y，z)は，円柱半径(r)，角度(θ)，高さ(h)の3パラメータを用いて，($r \cdot \cos(\theta)$，$r \cdot \sin(\theta)$，h)で表すことができます．円柱半径rは固定値，角度θは円周を16分割した値，高さhも16分割した値となりますので，角度θと高さhの変数でx y zの座標を表現できます．温度センサの座標値と温度測定データの値を用いてPlotly.jsで3Dグラフの描画を行います．

制御回路

温度センサ・アレイの制御に用いた回路を図9に示します．温度センサ・アレイは256個(円周上16個×高さ位置16個)のNTCサーミスタで構成されています．温度センサ・アレイは2個の16チャネル・マルチプレクサ(74HCT4067)を用いて，切り替えながら各NTCサーミスタの値を測定します．NTCサーミスタの抵抗値はNTCサーミスタと基準抵抗R_{10}(100 kΩ)の抵抗分圧法を用いて測定します．NTCサーミスタと基準抵抗との間には逆流防止用のショットキー・バリア・ダイオード(NSR0240MX2WT5G，オンセミ)が挿入されていますので0.2 V程度の電圧誤差が生じます．A-Dコンバータ(ADS1119)の入力部分は差動アンプ構成になっているので，マイナス入力端子にもショットキー・バリア・ダイオードを挿入して0.2 Vの誤差電圧が相殺される回路を追加します．

信号測定には分解能16ビットのΔΣ型A-DコンバータのADS1119を用い，I^2Cを通じてラズパイ Pico 2Wから制御します．ADS1119にはA_0とA_1端子があります．いずれも，DGND，DV_{DD}，SDA．SDLと接続でき，I^2Cアドレスを16通りで設定できます．今回はI^2Cアドレスが0x40になるように設定します．ADS1119には2.048 Vのリファレンス電圧が内蔵されていますが，外部端子への出力がないので別の2.048 VリファレンスIC(MCP1501-20E，マイクロチップ・テクノロジー)を用いて温度センサ・アレイへ供給する基準電圧とします．

制御基板の外部から5 V電源供給ができるようにUSB Type-Cコネクタを追加し，ペットボトルの水温を一定温度に加熱させるための水槽ヒータを駆動する電源にします．

完成した温度センサ・アレイの外観は写真1の通り

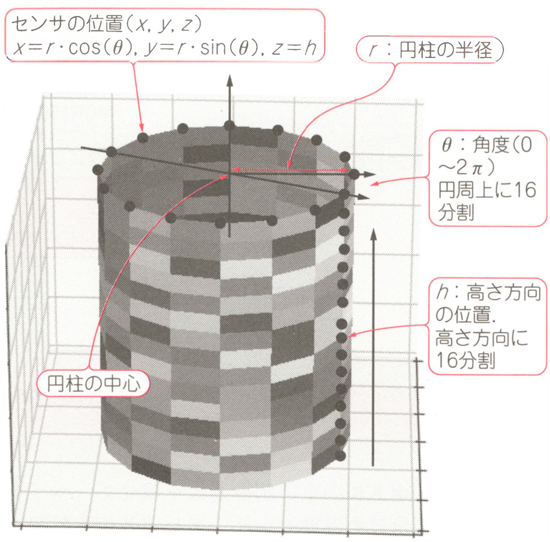


図8　センサ位置の座標
256個(16×16)のNTC温度センサはペットボトル表面に円柱形状に配置されている．センサ位置の座標は角度θと高さhの2つの変数によって表すことができる

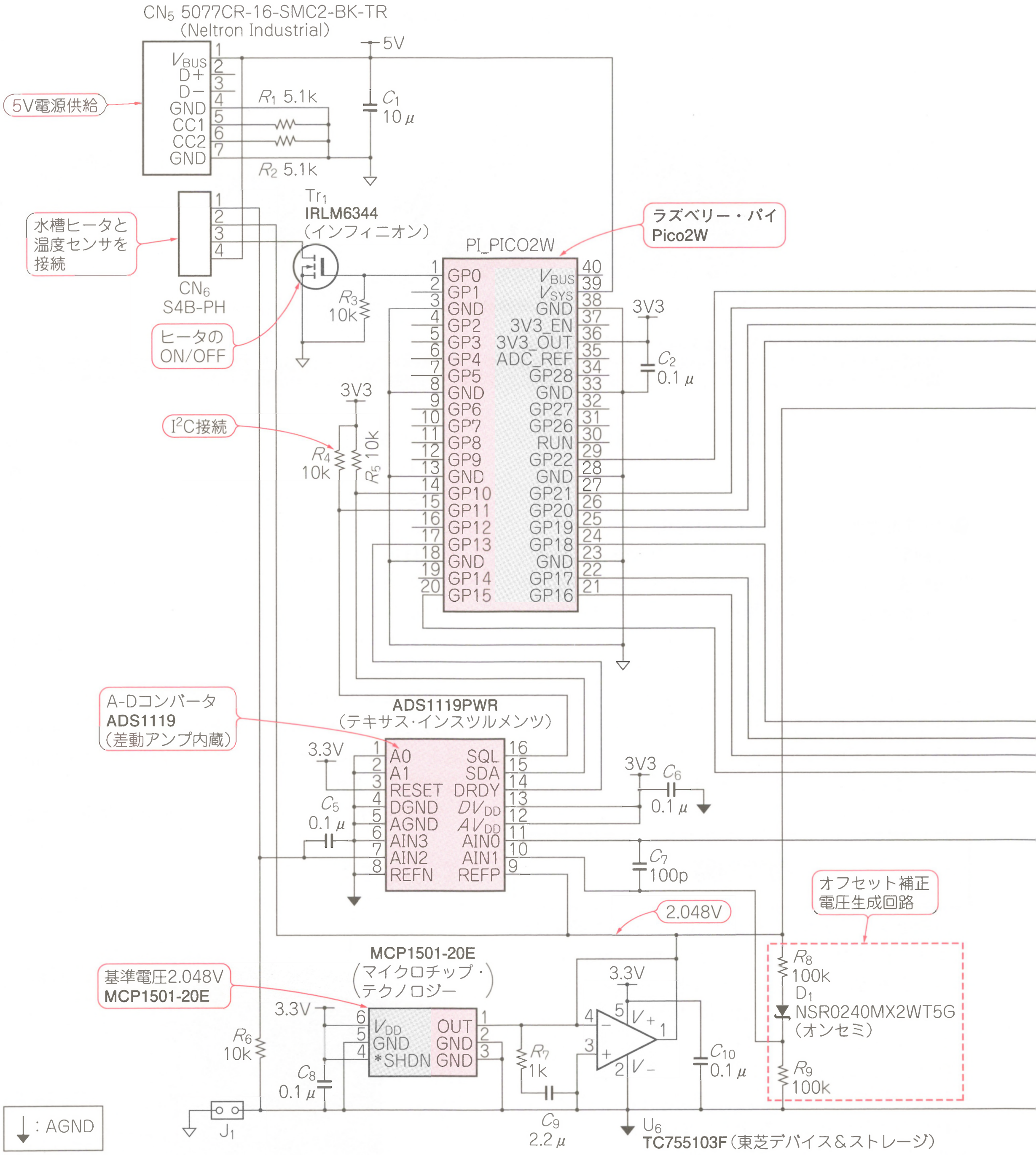


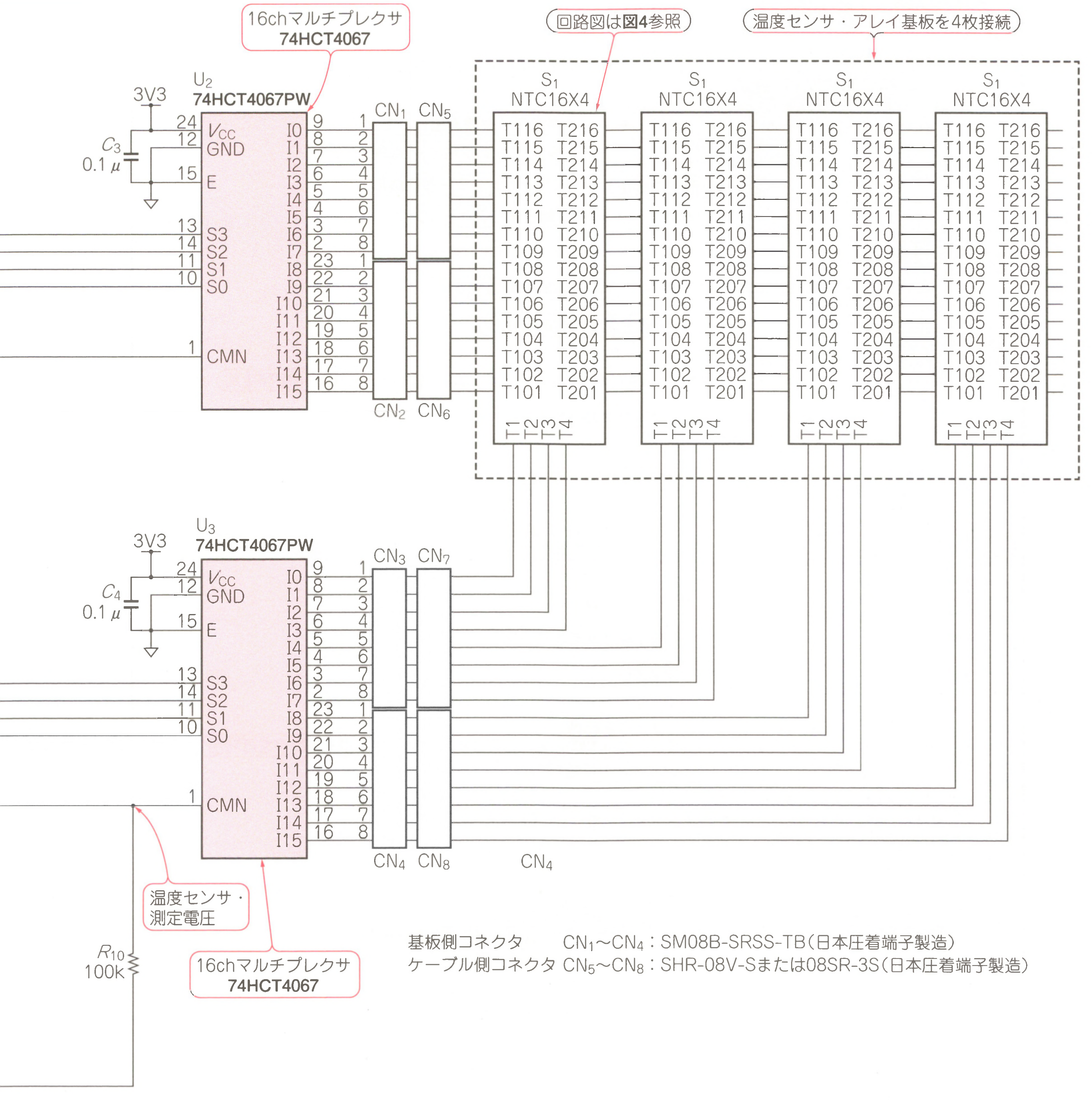
図9　制御回路
温度センサ・アレイ(16×16=256ポイント)の測定には，16チャネルのマルチプレクサを2個用いて，行列の各センサを順次切り替えながらA-Dコンバータで測定していく

です．ペットボトルの上に制御基板を載せて，ペットボトルに巻き付けた温度センサ・アレイ基板と配線接続します．

ラズパイPico 2Wプログラミング

● センサ・アレイ制御プログラム

Pico 2WのプログラムはPython統合開発環境



Thonnyを用いてMicroPythonで行います．温度センサ・アレイを制御するプログラムを**リスト1**に示します．

プログラムは，

①マルチプレクサの出力設定関数
②ADS1119から測定データを読み出す関数
③電圧測定関数
④配列生成関数
⑤メイン・プログラム

で構成されています．

メイン・プログラムは**リスト1**の⑤からで，最初に

リスト1　温度センサ・アレイを制御するプログラム

```
import network, socket, ujson, time
from machine import I2C, Pin
  ←(マルチプレクサ設定関数)
def set_mux_channel(channel):
    for i in range(8):
        mux_pins[i].value((channel >> i) & 1) ←(マルチプレクサのピンに出力)
  ←(データ読み出し関数)
def read_ads1119_voltage(vref=2.048, gain=1):
    i2c.writeto(ADS1119_ADDR, b'\x10') ←(測定データ読み出しコマンド)
    raw = i2c.readfrom(ADS1119_ADDR, 2) ←(測定データ(2バイト)取得)
    adc = (raw[0] << 8) | raw[1] ←(16ビット・データに成形)
    if adc & 0x8000:
        adc -= 0x10000 ←(2の補数型式に変更)
    voltage = (adc / 32768) * (vref / gain) ←(電圧値にスケーリング)
    return voltage
  ←(電圧測定関数)
def acq():
    i2c.writeto(ADS1119_ADDR, b'\x08') ←(A-D変換開始コマンド)
    time.sleep_ms(2)
    return read_ads1119_voltage() ←(電圧測定関数呼び出し)
  ←(配列生成関数)
def generate_temperature():
    voltage_matrix = [[0 for _ in range(16)] for _ in range(16)] ←(16×16配列生成)
    for ch in range(256):
        set_mux_channel(ch) ←(マルチプレクサの出力設定)
        time.sleep_us(100)
        voltage = acq() ←(電圧取得)
        row = ch // 16 }
        col = ch % 16  } ←(2次元インデックス(行・列)に変換)
        voltage_matrix[row][col] = round(37.67 * voltage + 25, 3) ←(電圧を温度に変換)
    return voltage_matrix[::-1] ←(配列リストの逆順
                                   センサ配置と表示方向を合わせるための処理)
(①ここからメイン・プログラム)
wlan = network.WLAN(network.STA_IF) ←(Wi-Fi設定)
wlan.active(True)
wlan.connect('ssid', 'password') ←(Wi-Fi接続)
while not wlan.isconnected(): ←(接続が完了するまで待機)
    pass

ip = wlan.ifconfig()[0] ←(IPアドレスを取得)
print('Connected on', ip)
addr = socket.getaddrinfo('0.0.0.0', 80)[0][-1]
server = socket.socket() ←(ソケット・サーバを起動)
server.setsockopt(socket.SOL_SOCKET, socket.SO_REUSEADDR, 1) ←(同じポート番号を再利用)
server.bind(addr) ←(ソケットをIPアドレスとポートに結びつけ)
server.listen(1)
print('Listening on', addr)
i2c = I2C(1, scl=Pin(11), sda=Pin(10), freq=100_000) ←(I2C設定)
ADS1119_ADDR = 0x40 ←(I2Cアドレス)
EXTERNAL_VREF = 2.048
mux_pins = [Pin(i, Pin.OUT) for i in range(15, 23)] ←(マルチプレクサのピン設定)
voltage_matrix = [[0 for _ in range(16)] for _ in range(16)] ←(測定データの配列定義)
i2c.writeto(ADS1119_ADDR, b'\x06') ←(ADS1119のリセット)
i2c.writeto_mem(ADS1119_ADDR, 0x40, b'\x0d') ←(ADS1119の測定条件設定)

while True:
    cl, addr = server.accept() ←(②)
    request = cl.recv(1024).decode() ←(パソコンからのデータを受信
                                        バイト列を文字列に変換)

    if request.startswith('GET /data'): ←(GET /dataを受信したら実行)
        temp_data = generate_temperature() ←(測定データをJSON型式に変換)
        response = ujson.dumps(temp_data)
        cl.sendall(b'HTTP/1.0 200 OK\r\nContent-Type: application/json\r\n\r\n')
        cl.sendall(response.encode()) ←(jsonデータを送信)

    elif request.startswith('GET /'): ←(GET /のみの受信なら実行)
        try:
            with open('index.html', 'r') as f:
                html_content = f.read()
            cl.sendall(b'HTTP/1.0 200 OK\r\nContent-Type: text/html\r\n\r\n')
            cl.sendall(html_content.encode()) ←(Index.htmlを送信)
        except:
            cl.sendall(b'HTTP/1.0 500 Internal Server Error\r\n\r\n')

    else:
        cl.sendall(b'HTTP/1.0 404 Not Found\r\n\r\n')

    cl.close()
```

リスト2　HTMLで記述された`index.html`
ラズベリー・パイ Pico 2Wのフラッシュ・メモリにファイル名`index.html`で保存する

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
  <script src="https://cdn.plot.ly/plotly-latest.min.js"></script>
</head>
<body>
  <h2>Pico W Plotly 3D Viewer</h2>
  <button onclick="fetchAndPlot()">START</button>
  <div id="plot" style="width:100%;height:600px;"></div>
  <script>
    function fetchAndPlot() {
      fetch('/data')
        .then(response => response.json())
        .then(data => {
          const num_theta = 16;
          const num_height = 16;
          const r = 1.0;
          const theta = Array.from({length: num_theta}, (_, i) => i * 2 * Math.PI / num_theta);
          const height = Array.from({length: num_height}, (_, i) => i * 5 / (num_height - 1));
          let x = [], y = [], z = [], color = [];

          for (let i = 0; i < num_height; i++) {
            for (let j = 0; j < num_theta; j++) {
              x.push(r * Math.cos(theta[j]));
              y.push(r * Math.sin(theta[j]));
              z.push(height[i]);
              color.push(data[i][j]);
            }
          }

          const trace = {
            x: x,
            y: y,
            z: z,
            mode: 'markers',
            marker: {
              size: 5,
              color: color,
              colorscale: 'Hot',
              cmin: 10,
              cmax: 50,
              colorbar: {
                title: 'Temperature (&deg;C)'
              }
            },
            type: 'scatter3d'
          };

          Plotly.newPlot('plot', [trace], {
            title: 'NTC Sensor Array',
            scene: {
              xaxis: {range: [-1.5, 1.5]},
              yaxis: {range: [-1.5, 1.5]},
              zaxis: {range: [0, 5]}
            }
          });
        });
    }
  </script>
</body>
</html>
```

Plotly.jsライブラリ読み込み
ボタン・クリックの動作
グラフが描画される領域
データ取得&描画関数
Pico 2Wから温度データを取得
円周方向
高さ方向
取得データを円柱座標に変換
座標と色の配列を生成
データを点で表示
温度に応じた色分け
表示温度範囲
Plotly描画設定
3D点群タイプで描画
グラフ軸の範囲

Wi-Fi接続，Webサーバ設定，I^2C機能設定，ADS 1119の初期化を行います．その後，Webサーバとして稼働させ，**リスト1**の②からの`While`ループでパソコンからのHTTPリクエストを待ちます．

パソコンからHTTPリクエストを受信したら，HTTPリクエストに測定要求のGET　`/data`が含まれているかどうかを確認します．

測定要求が含まれるリスエストを受信した場合，温度センサ・アレイの測定を行い，測定データをjson形式にしてパソコンに返信します．測定要求のないリ

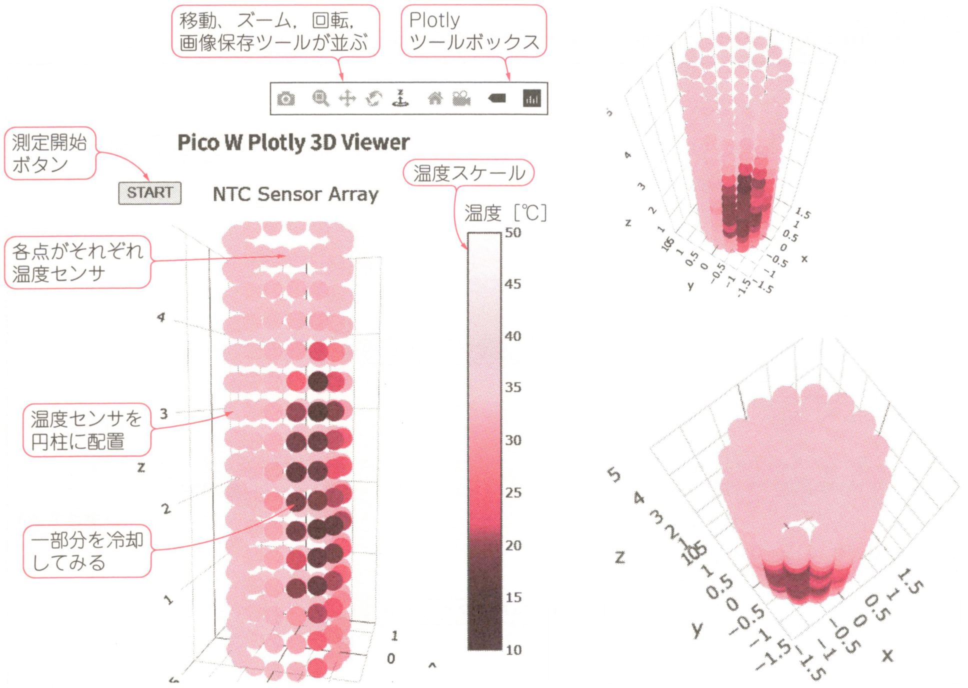


図10　測定結果の3D表示
Plotlyを用いて測定結果を簡単に可視化できる．また，目線をインタラクティブに動かせるので，あらゆる方向から測定結果を確認できる

クエストの場合は，index.htmlファイルをそのままパソコンに送信します．

Webブラウザに測定結果を表示するプログラム

パソコンに送るindex.htmlファイルの内容を**リスト2**に示します．index.htmlファイルはパソコンのWebブラウザに表示する内容がHTMLで記述されています．<head>の部分にPlotly.jsをCDNから読み込むコードが記述されています．パソコンのブラウザで動作させる内容は<body>の部分です．この部分にはブラウザに表示するボタン機能や測定データを受け取ったときにPlotlyで描画させるコードが記述されています．Plotlyの描画パラメータ(4)は，現在では生成AIを用いれば，ほぼ自動で目的のコードを生成できます．

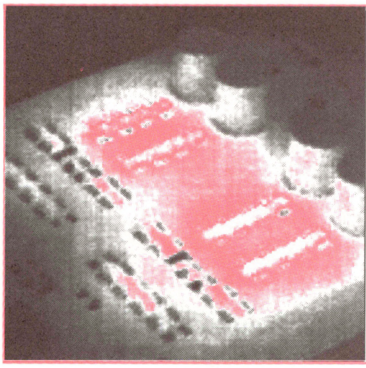
実験…3D温度分布をあらゆる角度から観察OK！

製作した温度センサ・アレイ装置を用いて温度測定を行います．外部から冷気や温風がない状態であれば，全ての温度センサはペットボトル水温付近となりブラウザに表示される円柱は同じ色の点の集まりとなります．この状態で1方向から冷気を加えて，温度センサの一部分に温度変化を起こした結果を**図10**に示します．冷気がかかった部分とその周辺部分が温度低下を起こして変化しているようすを確認できます．

Plotlyで描画するとブラウザ画面の上部にツール・ボックスが現れます．ツール・ボックスには移動，ズーム，回転，画像保存を行える機能がありますので，これらの機能を使うことで測定結果をあらゆる方向から確認できます．

◆参考・引用文献◆

(1) 田口 海詩；これからロボットの超センサ技術，トランジスタ技術，2025年1月号，pp.66-74，CQ出版社．
(2) 田口 海詩；磁気の強さが目に見える2D磁気ビュー・カメラの製作，トランジスタ技術，2023年3月号，pp.98-107，CQ出版社．
(3) ADS1119データシート，テキサス・インスツルメンツ．
https://www.ti.com/product/ja-jp/ADS1119
(4) Plotly JavaScriptホームページ
https://plotly.com/javascript/



第3章　並列駆動で熱を分散&出力インピーダンスを低減！

乾電池3本！出力段7並列低電圧ヘッドホン・アンプ

Takazine

ニッケル水素電池3本で動作するポータブル・ヘッドホン・アンプをディスクリートの出力段7並列プッシュプルで組みました(**写真1**).

電流帰還型, エミッタ抵抗レス, トランスリニア・バイアス, レール・スプリッタ式±電源という特徴があります.

回路

図1(pp.72-73)に, 今回製作したヘッドホン・アンプの1チャネルぶんの回路を示します. 入力バッファ, 出力バッファともにダイヤモンド・バッファで構成された, 典型的な電流帰還アンプです. ただし, エミッタ抵抗を省いたり, 終段トランジスタを多数並列接続したりという特徴があります.

図1のQ_5, Q_6が入力のダイヤモンド・バッファで, Q_{17}, Q_{18}, Q_{21}, Q_{22}, Q_{25}, Q_{26}, Q_{31}, Q_{32}が出力のダイヤモンド・バッファです. カレント・ミラー①はダイヤモンド・バッファの動作電流を決定している定電流回路, カレント・ミラー②は本アンプ唯一の電圧増幅部です.

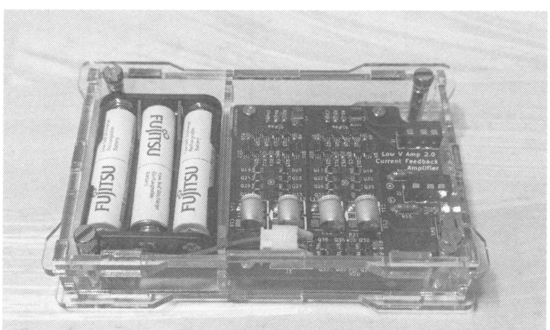


写真1　乾電池3本動作の出力段7並列プッシュプル構成のポータブル・ヘッドホン・アンプ
電池3本で動作するディスクリート電流帰還型アンプ

● デュアル・トランジスタ

使用したトランジスタは, PMP4201Y(NPN×2個入り, Nexperia)とPMP5201Y(PNP×2個入り, Nexperia)です.

このトランジスタには以下の特徴があります.

(1)直流電流増幅率h_{FE}の比率0.98～1.02
(2)ベース-エミッタ間電圧V_{BE}の差−2 m～+2 mV
(3)内部での熱結合
(4)カレント・ミラーや差動回路に適したピン配置

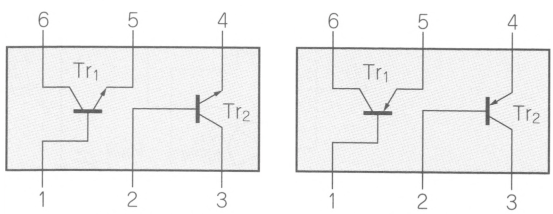
図2にピン配置を示します.

今回のヘッドホン・アンプは, このデュアル・トランジスタの強力なペア特性に頼った設計にしました. 最大定格電圧V_{CEO}=45 V, 最大コレクタ電流I_C=100 mA, トランジション周波数f_T=100 MHz$_{(min)}$など, ほかの項目は一般的な小信号用トランジスタと同等です.

以降の説明をわかりやすくするため, **図1**の入力バッファのQ_{5a}/Q_{6a}のNPN/PNPペアを前段, Q_{5b}/Q_{6b}のNPN/PNPペアを後段と呼ぶことにします. 出力バッファ部についても同様です.

● 定電流回路

ダイヤモンド・バッファの前段トランジスタの動作電流を決定しているのが, **図1**中のカレント・ミラー①です. 電源電圧は, ニッケル水素電池1.2 V×3本=3.6 V(充電直後では1.35 V×3本=4.05 V)になります.



(a) PMP4201Y　(b) PMP5201Y

図2　使用したデュアル・トランジスタのピン配置
2つのトランジスタのエミッタ, ベースが隣り合ったピン配置で, カレント・ミラー回路や差動アンプのプリント・パターンが引きやすい

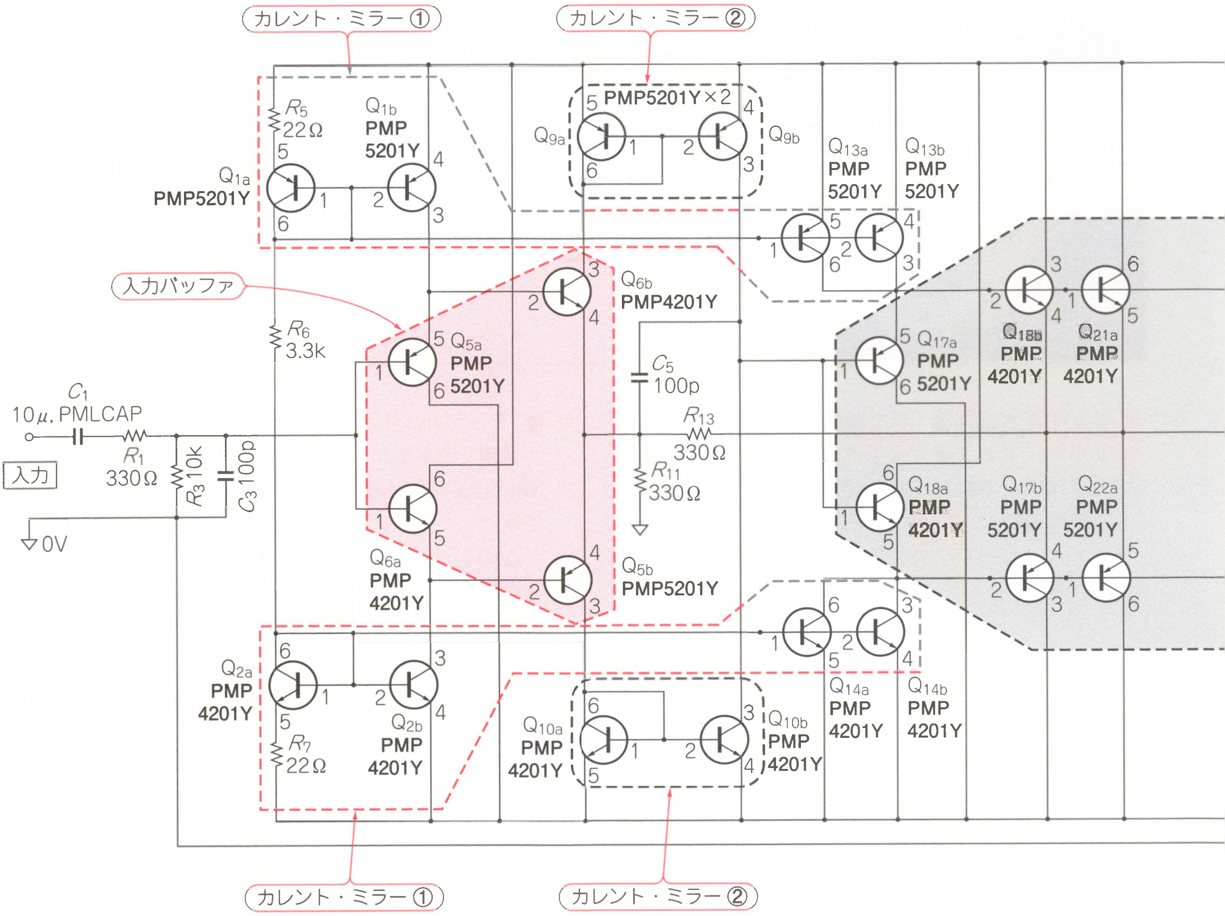
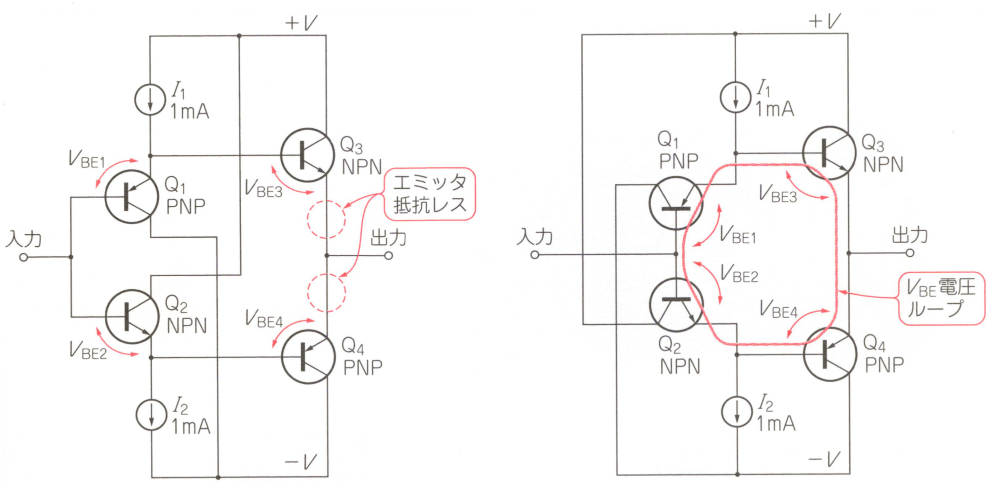


図1　製作したヘッドホン・アンプの回路
1チャネルぶんの回路図．出力段は7並列接続されている．電源部分はコラムを参照のこと

R_6(3.3 kΩ)が電流値を決定している抵抗です．上下トランジスタのV_{BE}を約0.6 Vとして，次式で電流値を求められます．

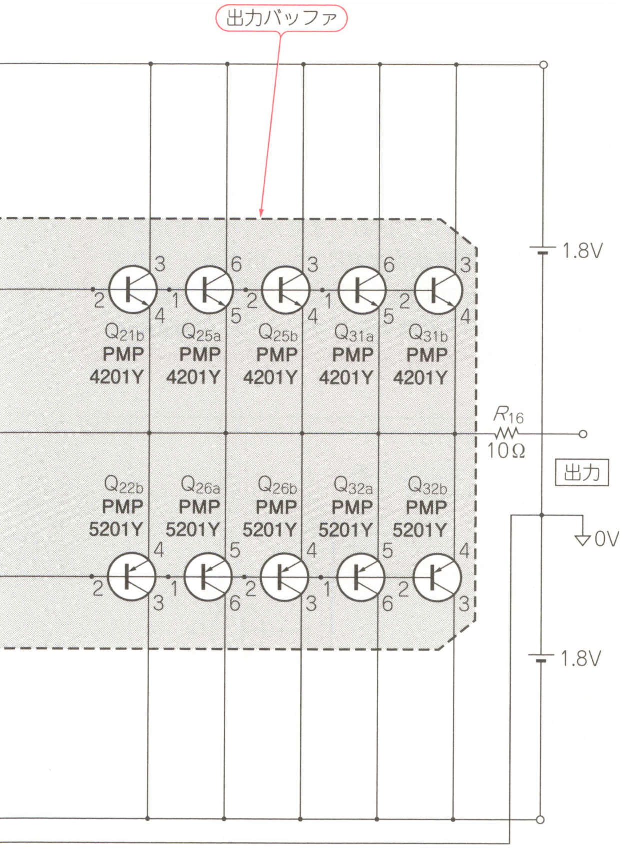
$$I_{R6}=\frac{3.6\ \mathrm{V}-0.6\ \mathrm{V}\times 2}{3.3\ \mathrm{k\Omega}}=0.73\ \mathrm{mA}$$

Q_{1A}，Q_{2A}のエミッタに挿入してある22 Ωは，カレ



(a) 回路　　(b) トランジスタを回転

図3　ダイヤモンド・バッファ回路
(a)，(b)はQ_1，Q_2を回転させただけの同じ回路．(b)ではV_{BE}電圧ループがわかりやすい



ント・ミラー回路後段の電流値を倍増させる目的があります．少しでも電池の消費電流を削減する目的で，片側のみエミッタ抵抗を入れる形にしました．抵抗値は実測により定電流出力が1.1 m～1.3 mA（電池電圧で変動）になるように調整し，入力バッファ前段（Q_{5A}，Q_{6A}）へ流れる電流をコントロールしています．

出力バッファ側は，カレント・ミラー回路の出力Q_{13}，Q_{14}の2並列トランジスタで合計2.2 m～2.6 mA流れるようにしました．

● 入力ダイヤモンド・バッファ

図3(a)に，ダイヤモンド・バッファ部だけ切り出した回路を示します．図3(b)はトランジスタの記号を回転させた同じ回路です．

Q_1とQ_2のベース-エミッタ間電圧V_{BE1}とV_{BE2}は，どちらも定電流源からエミッタ電流（≒コレクタ電流）が供給されています．熱結合されたV_{BE3}とV_{BE4}もほぼ同じ電圧となり，入力電圧と出力電圧が同じであれば，カレント・ミラー回路と同様に前後段のコレクタ電流は等しくなります．

● 出力ダイヤモンド・バッファ

基本的な回路は入力バッファと同じですが，以下の2点が異なります．

(1) 定電流回路の電流が2倍
(2) 出力側トランジスタが7並列

ともに出力インピーダンスを下げる効果があります．

数式で表すと，エミッタ・フォロワの出力インピーダンスZ_Oは次のようになります．

$$Z_O = \frac{1}{1+h_{FE}}\left(R_S + \frac{h_{FE}}{g_m}\right) \cdots\cdots (1)$$

R_S：入力インピーダンス
$g_m = (q/kT)I_C$
$q = 1.602\times10^{-19}$[C]…電子の電荷
$k = 1.3805\times10^{-23}$[J/K]…ボルツマン係数
T：絶対温度[K]

温度を300 K（26.85 ℃）とすると，$g_m \fallingdotseq 40\times I_C$と計算を簡略化できます．

ここで，h_{FE}を300，コレクタ電流I_Cを3 mA，R_Sを1 kΩとしてZ_Oを計算してみると，下記のようになります．

$$Z_O = \frac{1}{1+300}\left(1\,\mathrm{k} + \frac{300}{40\times3\,\mathrm{m}}\right) \fallingdotseq \frac{1\,\mathrm{k}}{301} + \frac{1}{120\,\mathrm{m}}$$
$$= 3.3\,\Omega + 8.3\,\Omega = 11.6\,\Omega$$

式の前項はR_Sとh_{FE}に依存し，後項はI_Cで決まります．h_{FE}はトランジスタのばらつきで大きく変わる（h_{FE}ランクを指定しても2倍程度の範囲の広さ）数値になりますが，I_Cは回路設計で決めることができます．I_Cを2倍流すと後項は半分になります．つまり，動作電流を増やすと，Z_Oを下げる効果があります．

本アンプでは，さらに出力トランジスタを7並列化しました．単純計算すると，NPN/PNPのプッシュプルで合計14個のエミッタ・フォロワ回路があるので，

$$Z_O = 11.6\,\Omega \div 14 = 0.83\,\Omega$$

となります．

ただし，ばらつきの大きなh_{FE}に依存する項があるため，計算結果は実際に組んだ回路と差が出ることがあります．

● エミッタ抵抗レス

本アンプでは，入力バッファにも出力バッファにもエミッタ抵抗が入っていません．カスコード・ブートストラップ回路[3]を付けて発熱を抑えるようにもしていません．

しかし，今回のアンプでは電源電圧が±2 V以下と低いため，そもそも熱暴走するほど発熱しません．

入力バッファのコレクタ損失は，

$$P_C = 1.3\,\mathrm{mA}\times2\,\mathrm{V} = 2.6\,\mathrm{mW}$$

出力バッファのコレクタ損失は，

$$P_C = 2.6\,\mathrm{mA}\times2\,\mathrm{V} = 5.2\,\mathrm{mW}$$

コラム1　DCオフセット

電流帰還型アンプは高速/広帯域という特徴がある一方，差動回路を使った電圧帰還型アンプと比べてDC安定度に関しては得意ではありません．

本ヘッドホン・アンプも，トランジスタのばらつきによりDCオフセットが出てしまいます．試作を合わせて8台ほど製作しましたが，外れを引いてしまうと40 mVのオフセット電圧が出てしまうこともありました．Q_5もしくはQ_6のどちらかを交換することで，±10 mVまで合わせこむことができます．また，電池残量(徐々に電圧降下)により5～10 mVほど変化します．

一般的なヘッドホンでは，±10 mV程度のオフセットは問題になることはありません．ヘッドホン以外の駆動など使用状況に応じて，出力カップリング・コンデンサの追加，もしくはDCサーボ回路の追加などの対策をお勧めします．〈Takazine〉

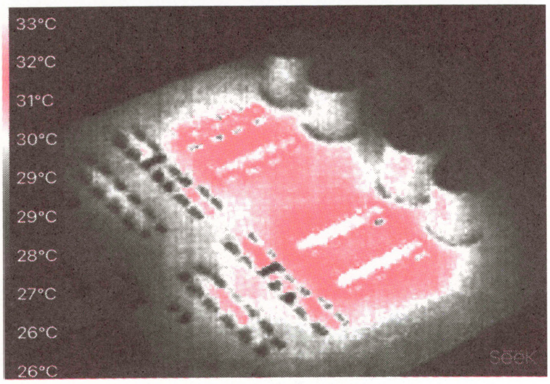


図4　サーモ・ビューアで見た温度分布
電源電圧が低いため温度上昇はわずか．7並列トランジスタ部分はほぼ均一な温度

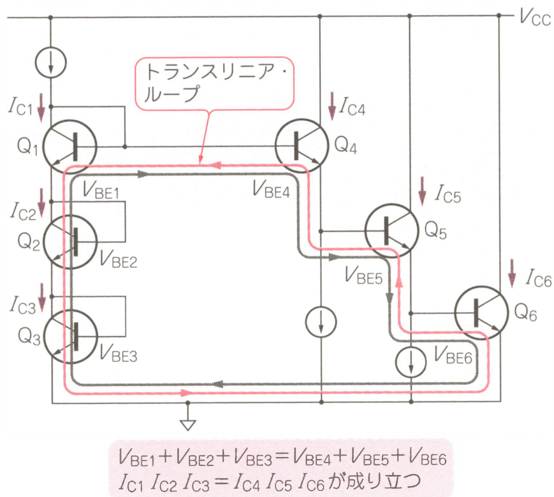


図5　バリー・ギルバート氏のトランスリニア原理
トランジスタのV_{BE}の和が等しい回路ではコレクタ電流I_Cの積は等しい

と小さく，2つのトランジスタを合わせてもPMP4201Y，PMP5201Yの許容損失300 mWの1/29程度です．

図4はサーモ・ビューアで測定した温度分布です．指で触っても暖かさを感じない程度で，エミッタ抵抗レスでも熱暴走していません．

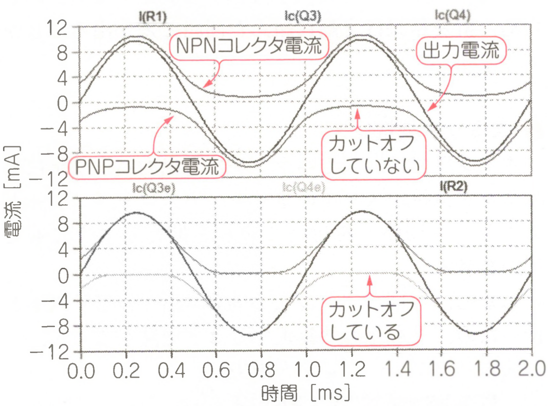


図6　エミッタ抵抗の有無で比較したコレクタ電流
上段はエミッタ抵抗レス，下段は22 Ωのエミッタ抵抗を入れた場合の電流波形．上段はコレクタ電流がカットオフしていない

トランスリニア・バイアス

図3(b)のようにエミッタ抵抗がないダイヤモンド・バッファは，Q_1，Q_2，Q_3，Q_4によるV_{BE}電圧ループが完成し，前後段のV_{BE}の和が等しいときコレクタ電流I_Cの積は等しくなるトランスリニア原理が成り立ちます(**図5**)．

すなわち，$V_{BE1}+V_{BE2}=V_{BE3}+V_{BE4}$のとき，

$$I_{C1}\cdot I_{C2}=I_{C3}\cdot I_{C4}$$

が成り立ちます．I_{C1}とI_{C2}は前述の定電流回路から一定電流が流れているため，I_{C3}，I_{C4}電流は枯れることはありません．

図6は，エミッタ抵抗の有無で比較したシミュレーション波形です．エミッタ抵抗22 Ω，負荷抵抗100 Ω，信号振幅1 V_{p-p}でシミュレーションしました．信号がクロスオーバする際に電流がカットオフしないのでスイッチングひずみが発生せず，クロスオーバひずみも小さくなるメリットがあります．

コラム2　出力トランジスタ7並列の効果

本アンプのように多量に負帰還がかかったアンプでは，出力段を多数並列化してもひずみ率や出力インピーダンスに対する効果は測定誤差程度でしかありません(熱分散を除く)．

しかし，負帰還をかけていない素の特性として計算したようにZ_Oは低インピーダンス化されており，実際に音楽を聴いてみると差は確かに感じます．

プラシーボ効果，自己満足の世界と言われるとそれまでですが，自作派として自己が満足できないアンプを作るよりずっと楽しめると思います．

〈Takazine〉

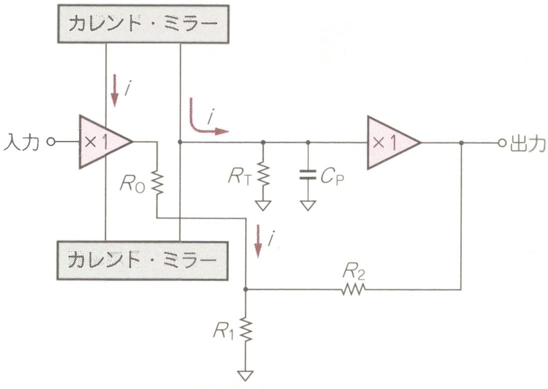


図7　単純化した電流帰還型アンプ
$R_O \ll R_1$，$R_O \ll R_2$の条件では伝達関数を簡略化できる．また，カットオフ周波数はR_2とC_Pのみで決まるため仕上がりゲインに影響しない

電流帰還型アンプの伝達関数

図7に，単純化した電流帰還型アンプのブロック図を示します．入力バッファの出力インピーダンスをR_Oとして，アンプの伝達関数は次式で表されます．

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1+\dfrac{R_2}{R_1}}{1+j\omega C_P R_2\left(1+\dfrac{R_O}{R_2}+\dfrac{R_O}{R_1}\right)} \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

クローズド・ループのカットオフ周波数f_{CL}は次式となります．

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi R_2 C_P\left(1+\dfrac{R_O}{R_2}+\dfrac{R_O}{R_1}\right)} \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

ここで，$R_O \ll R_1$，$R_o \ll R_2$の条件では簡略化できて，

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi R_2 C_P} \quad \cdots\cdots\cdots (4)$$

となります．この式から，カットオフ周波数はR_2と内部容量C_Pのみで決定され，仕上がりゲインに左右されないことがわかります．

仕上がりゲインは，

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2+R_1}{R_2} \quad \cdots\cdots\cdots (5)$$

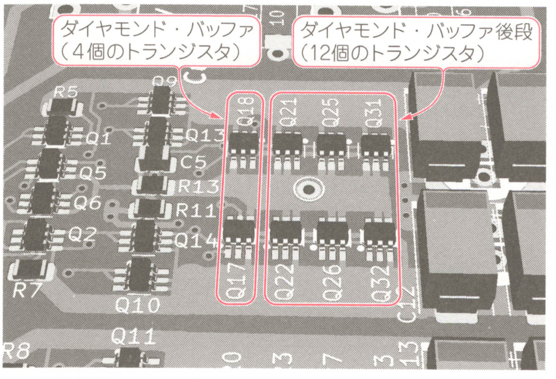


図8　7並列部のプリント・パターン
各トランジスタのコレクタ端子，エミッタ端子をべた銅箔パターンで接続して可能な限り熱結合した

となります．

今回のヘッドホン・アンプの仕上がりゲインは**図1**のR_{11}，R_{13}定数と式(5)から，

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{330+330}{330} = 2倍$$

となり，カットオフ周波数はC_5，R_{13}定数と式(4)から，

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi \times 100\ \mathrm{pF} \times 330\ \Omega} = 4.82\ \mathrm{MHz}$$

となります．

部品配置と銅箔パターン

エミッタ抵抗レスにしたので，発熱のバランス(電流のバランス)を取るため部品配置と銅箔パターンも重要な設計ポイントになってきます．**図8**に1チャネルぶんの基板パターンを示します．Q_{17}，Q_{18}が出力部のダイヤモンド・バッファです．デュアル・トランジスタですので，2つに見えるトランジスタがNPN/PNPトランジスタ4つぶんになります．Q_{21}，Q_{25}，Q_{31}がNPN側の後段6トランジスタ，Q_{22}，Q_{26}，Q_{32}がPNP側の後段6トランジスタです(**図1**の出力バッファ部も参照)．

合計12トランジスタは前段トランジスタと直接的に熱結合されていないため，エミッタとコレクタ同士を接続したべた銅箔パターンを配して前段を含むQ_{17}，

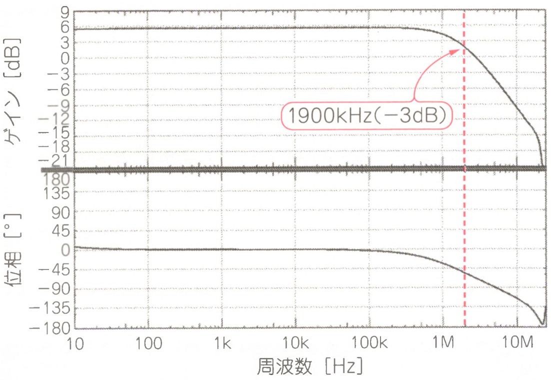


図9　実測した周波数特性
Analog Discovery を使って周波数特性を計測した．負荷は33 Ω．f_C＝1900 kHz

Q18の温度を均一にするようにしました．熱の分布はサーモ・ビューア画像(**図4**)のように均一になっていました．各トランジスタ個別に電流を測ることができない基板パターンでしたが，発熱がほぼ等しいことから電流バランスが取れていると考えられます．

完成したヘッドホン・アンプの測定

ここからは製作したヘッドホン・アンプの測定です．負荷は一般的なヘッドホンのインピーダンスに合わせて33 Ωとしました．

周波数特性

Analog Discovery を使ってゲインと位相を表示させたものが**図9**です．カットオフ周波数f_C(−3 dB)は約1900 kHzでした．計算結果の半分程度の周波数ですが，入力ローパス・フィルタ(4.8 MHz)の影響と各トランジスタのV_{CE}電圧(1.2〜1.8 V)領域におけるトランジション周波数f_Tの落ち込み，基板パターンの浮遊容量などが影響したと考えられます．それでも可聴帯域の10倍近い帯域です．

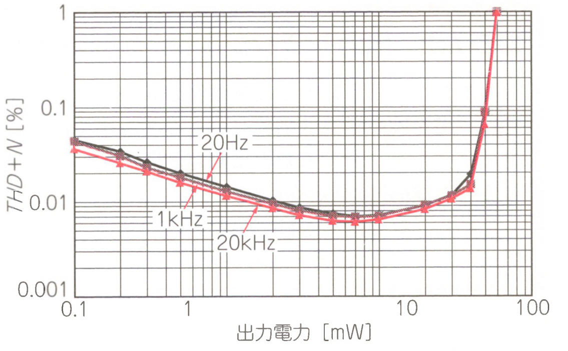


図11　実測したひずみ率特性
VP-7722A を使って計測した．どの周波数でもほぼ同じカーブになっている

スルー・レート

図10に実測したスルー・レートを示します．

立ち上がり：25.623 V/μs
立ち下がり：27.261 V/μs

高速で，ハイレゾ音源にも余裕で対応できます．

ひずみ率特性

オーディオ・アナライザVP-7722A(パナソニック)を使ってひずみ率を計測しました．5 m〜10 mW付近で0.007 %ほどでした(**図11**)．20 Hz，1 kHz，20 kHzともほとんど同じカーブを描いています．これはオープン・ループ帯域幅が十分に広く，少なくとも帰還量が20 kHzまで減衰していないためと考えられます．出力は40 m〜50 mWあたりでクリップしています．

一般的なヘッドホンでは1 m〜2 mW程度で十分な音量が得られ，10 mWを超えると爆音になります．このひずみ率特性から，電池3本駆動でも十分な音量

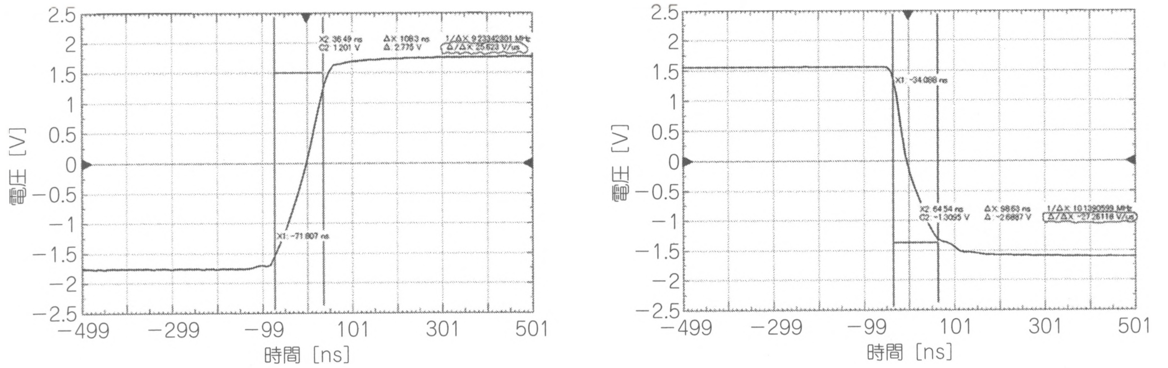


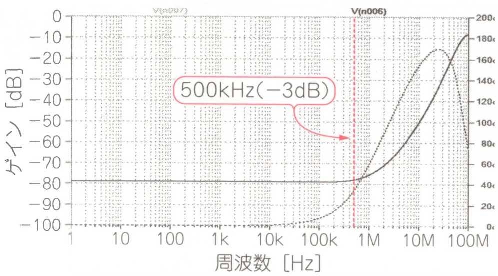
図10　実測したスルー・レート
Analog Discovery にて方形波入力して，出力の立ち上がりと立ち下がりのスルー・レートを計測した

コラム3　レール・スプリッタによる±電源

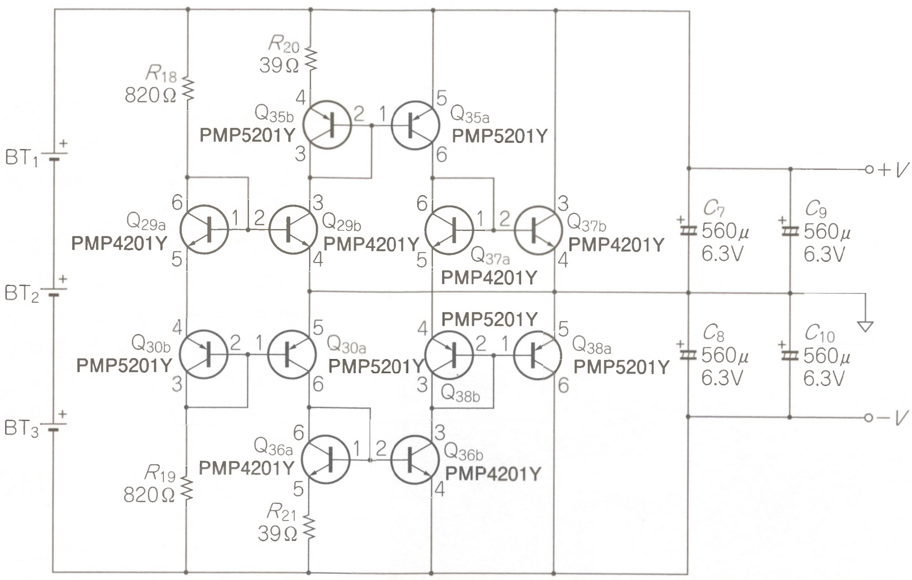
本機は市販ケースの関係で電池3本になってしまい，±電源に電池1本ずつ，2本ずつなど振り分けられません．そこで，中心電圧(仮想グラウンド)を生成するレール・スプリッタ回路をディスクリートで組みました．**図A**が回路図です．ヘッドホン・アンプ部と同じトランジスタPMP4201YとPMP5201Yを使って電流帰還型としました．プリント配線をシンプルにするため，入力/出力バッファともダイヤモンド・バッファではなく，前段トランジスタをダイオード接続したバイアス電圧生成回路とし，100%帰還しました．

本アンプをシミュレーションしてみると，500 kHzあたりまで負荷変動除去の周波数帯域が伸びています(**図B**)．この辺は電流帰還型ならではの高速応答と考えられます．さらに高周波な領域は，±電源と中心電圧間にコンデンサを付けてしまえばOKです(**図A**のC_7～C_{10})．

〈Takazine〉



図B　本レール・スプリッタの周波数応答
出力コンデンサを一切付けていないときの負荷変動をシミュレーションした



図A　電流帰還型レール・スプリッタ回路
高速応答性に優れた電流帰還型．ヘッドホン・アンプ部と同じデュアル・トランジスタを使った

が得られます．

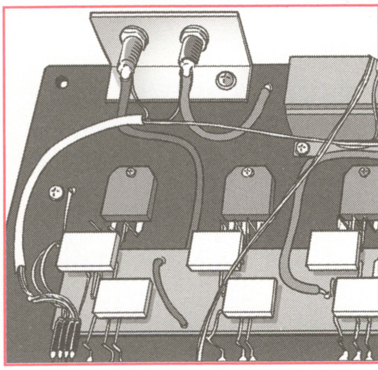
● そのほかの計測結果

- S/N：100 dB(A-Wait，1 V出力時)
- 残留ノイズ：10 μV(A-Wait)
- 消費電流：70 mA(レール・スプリッタ部含む)
- 最大振幅電圧：±1.25 V(ニッケル水素電池3本)
- 最大出力電流：500 mA(片チャネル)
- 最大出力：40 mW(33 Ω，ノンクリップ)

製作したヘッドホン・アンプ「Low-v-amp2.0」基板は千石電商，スイッチサイエンスにて販売中です．はんだ付けは超上級難易度です．

◆参考文献◆

(1) 柴田 肇；トランスリニア回路の動作，トランジスタ技術，2004年10月号，pp.241-245，CQ出版社．
(2) アナログ・デバイセズ著，電子回路技術研究会訳；OPアンプ大全，第2部，CQ出版社．
(3) Takazine；入出力差動のオーディオ信号アンプの動作，トランジスタ技術，2024年4月号，p.54，CQ出版社．



第4章 大電力ほど必須の並列技術！ 電流制御はMOSFETよりバイポーラ！

トランジスタ6並列！ 100W級の定電流負荷回路

下間 憲行 Noriyuki Shimotsuma

出力100W超！ 製作したい定電流負荷回路

● 定電流負荷回路とは

直流電源の性能を評価する際に，一定の電流を流し続けている状態で電圧変動や安定性を調べる必要があります．そこで，電源電圧が変動しても電流を維持する定電流負荷回路が必要になります．

● 12 V×10 A＝100 Wクラスの定電流負荷回路に挑戦

今回は，12 V・10 A定格の直流電源を性能調査するために，定電流負荷回路を自作しました(**写真1**)．これまでも，電子負荷回路はあれこれ作ってきましたが，100 Wを超える電力は未体験です．

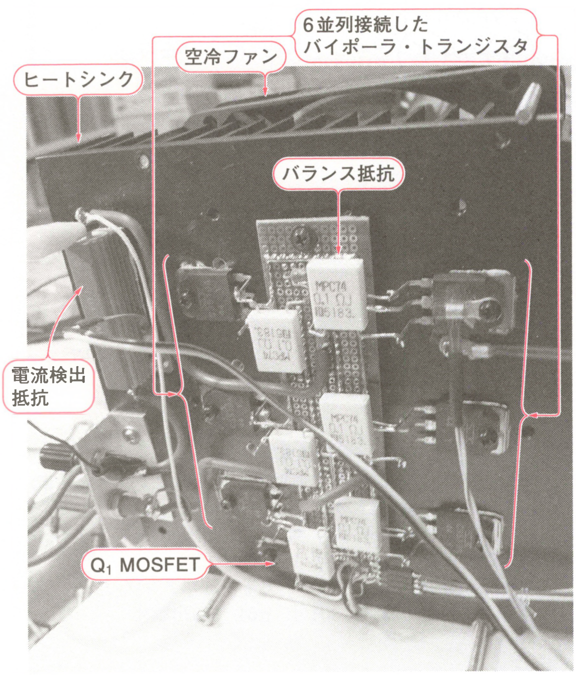


写真1　トランジスタを6並列した100 Wクラスの定電流負荷回路
ヒートシンクに取り付けた6つのバイポーラ・トランジスタを並列に接続

基本的な動作原理は，電流検出抵抗での電圧降下をフィードバックして，パワーMOSFETのゲート電圧を制御することで一定電流を維持します．その際に問題は電力です．12 V・10 Aなら最大120 Wもの電力を半導体素子で消費することになります．1つのFETではとても無理なので，複数個を並列接続して発熱を分散しなければなりません．

パワーMOSFETの基礎を確認します．

①温度が上がるとオン抵抗が大きくなる．並列接続で電流が流れて温度が上がった素子は，オン抵抗が大きくなることで電流が減る．並列接続での熱暴走はしない
②①はスイッチングするときの話で，電子負荷のようなリニア領域の制御ではV_{th}とV_{GS}の特性が重要
③残念ながら，温度とドレイン電流の関係は並列接続には向いていない．温度が上がるとV_{GS}が一定でもドレイン電流が増大する．温度が上がるとその石に電流が集中してしまう

実験…パワーMOSFETで

● パワーMOSFETを並列にして試してみると

図1に示すように，2つのMOSFETを使って発熱変動を確かめてみました．R_S＝0 Ωのときの電流変化(R_D両端の電圧で観察)を**図2**に示します．時間経過

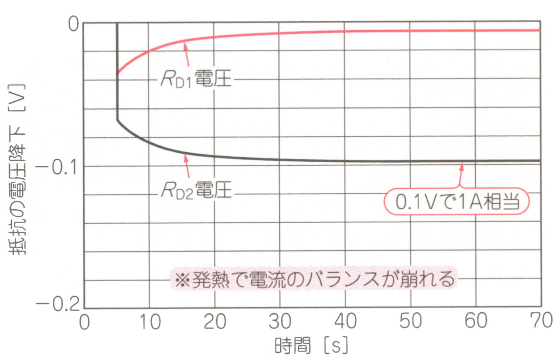


図2　R_S＝0 Ωのときの電流変化(R_D両端の電圧で観察)

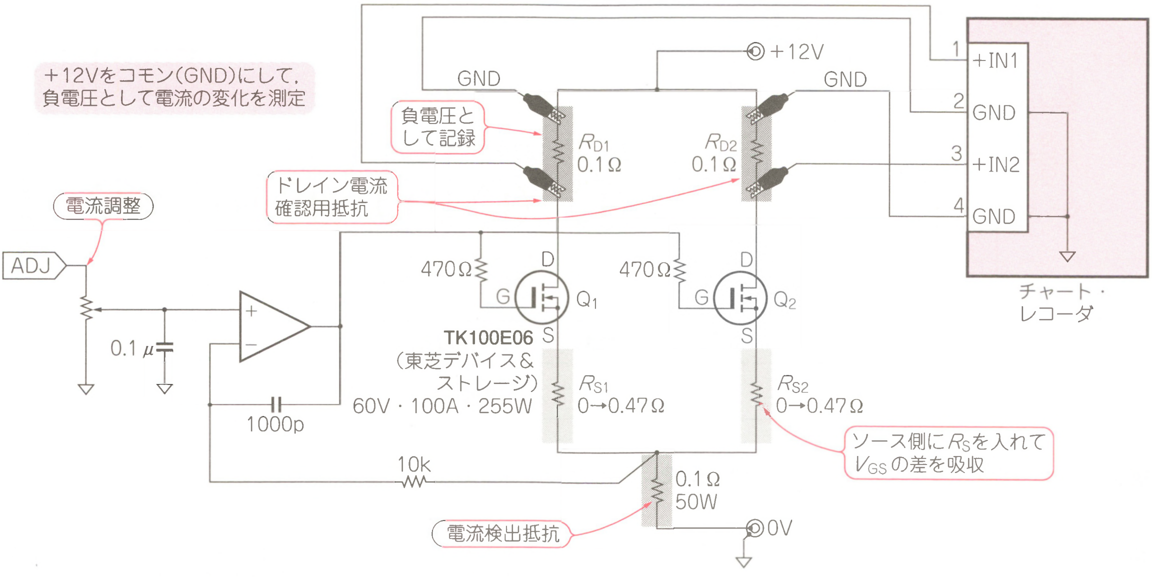


図1　パワーMOSFETで構成した100Wクラス定電流負荷回路…2つのパワーMOSFETで電力消費を分散したが結論としては電流バランスをとるのが難しくて選ばなかった

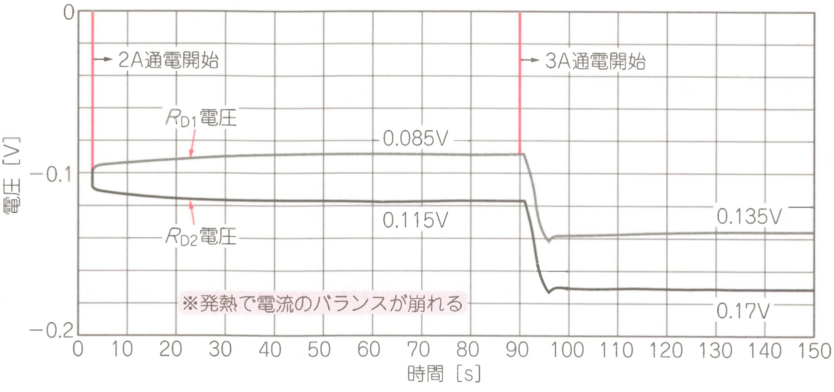


図3　ソース側に抵抗を入れてV_{GS}のアンバランスを吸収できるようにしてみた．R_S＝0.47Ωでの計測値

とともにバランスが崩れてQ_2の電流が増大し，Q_1に電流が流れなくなりました．「なんのための並列？」という状態です．

次に，ソース側に抵抗を入れてV_{GS}のアンバランスを吸収できるようにしてみました．電流が増えるとR_S両端の電圧が大きくなり，V_{GS}が下がります．結果として，そのFETの電流が減ります．R_S＝0.47Ωでのようすを図3に示します．電流を3Aに増やすと差が目立ってきます．R_S＝1Ωにするとバランス抵抗の効きが良くなりますが，この抵抗の発熱がひどくなってしまい本末転倒です．

● FETごとにアンプと電流検出抵抗を設ける手法も

FETごとにアンプと電流検出抵抗を設けて共通の制御電圧で電流を設定する方法があります．**図4**のような回路で，FETを3つ使って40Wを目指している

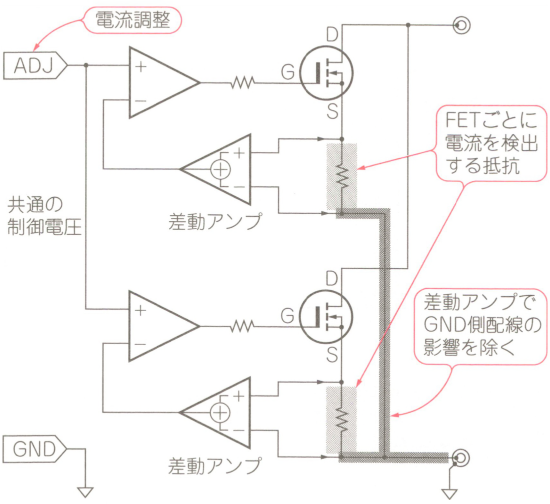


図4　FETごとに電流検出抵抗を入れる方法もあるにはあるが…

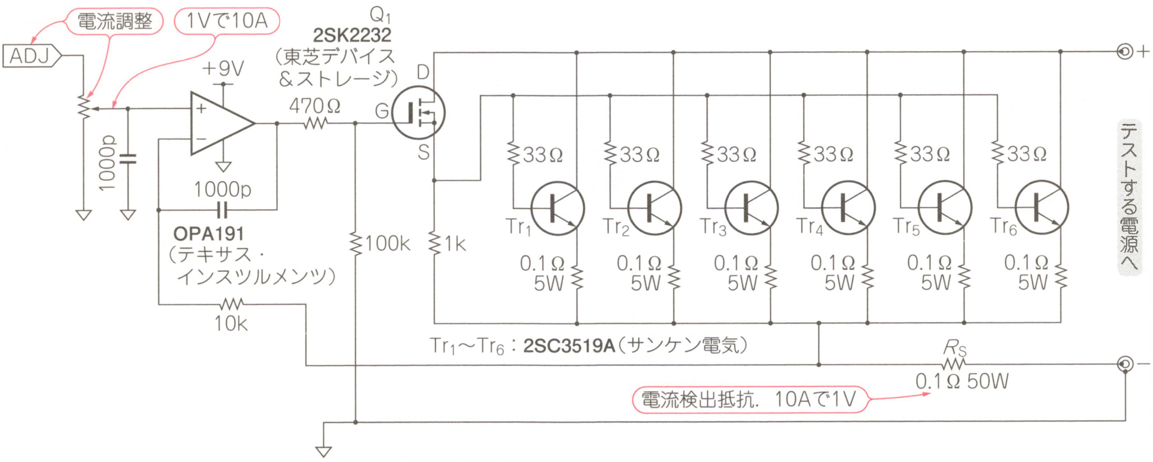


図5　バイポーラ・トランジスタを6並列回路で構成した100Wクラス定電流負荷

例がありました[1]．

この方法は，ゲインのある差動アンプを使うと，電流検出抵抗の値を小さくできるメリットがあります．しかし，電流検出の要である電流検出抵抗を1つだけにしておきたかったので，この方式はパスしました．

実験…バイポーラ・トランジスタに変更

バイポーラ・トランジスタの並列接続

パワーMOSFETの電流が決まるV_{GS}電圧は3～5Vと大きく，バランス抵抗による電流抑制の効きが良くありません．FETをバイポーラ・トランジスタに代えると，V_{BE}電圧が0.8～0.9Vあたりでバランスが得られます．

OPアンプの出力にFETを入れて，そのソース電流で並列接続したバイポーラ・トランジスタのベースを駆動します．すると，R_S = 0.1Ωでも電流の分散は押さえられました．**図5**に示すように，トランジスタを6個並列にして大電力を狙います．

目標が12V・10Aなので，1素子あたりの電流は1.7Aです．でも，耐えなければならない電力は20Wです．20Wといえばはんだごての電力です．集中すればはんだを溶かすほどの熱になります．

使ったヒートシンクは，170mm×180mm×35mm，30mm長のフィンが10mm間隔で並んでいます．シリコンの絶縁シートを使わず，トランジスタをヒートシンクに直接ネジ止めしたので，ヒートシンクにはプラス電圧が加わります(**写真1**)．

表1　トランジスタ6並列回路の電流分布

Tr番号	0.1Ω両端電圧[V]	33Ω両端電圧[V]	h_{FE}
Tr_1	0.227	0.454	165
Tr_2	0.193	0.491	130
Tr_3	0.199	0.483	136
Tr_4	0.195	0.483	133
Tr_5	0.199	0.479	137
Tr_6	0.186	0.493	125

※予備実験だったので6V・12Aで試した

表2　駆動電流を変えたときのQ_1のゲート電圧とソース電圧の変化(GND基準)

設定電流[A]	ゲート電圧[V]	ソース電圧[V]	V_{GS}[V]
1	2.3	0.8	1.5
5	3.2	1.5	1.7
10	4.1	2.4	1.7
12	4.5	2.7	1.8

製作した回路を評価してみる

電流を流してみる

トランジスタのエミッタに入れたバランス抵抗0.1Ωの両端電圧を測れば，それぞれのトランジスタに分かれた電流値が読めます．そしてベース抵抗両端の電圧を測ればベース電流がわかります．そこからトランジスタのh_{FE}(直流電流増幅率)が計算できます．

Tr_1のh_{FE}が他より大きかったせいで，**表1**に示すように，Tr_1の電流が2割ほど大きくなっていました．電流をバランスさせたいときはh_{FE}の事前選別が必要なようです．

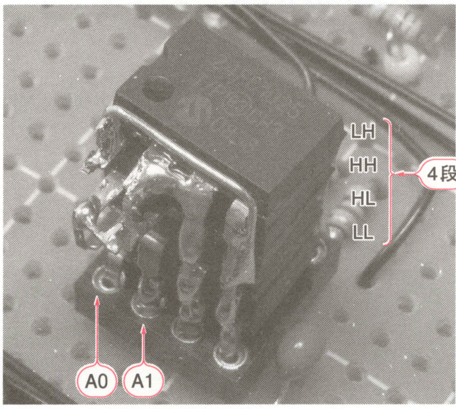
表2は，設定電流を変えたときのQ_1 MOSFETのゲート電圧とソース電圧の変化です．電流を大きくすると，5V電源ではOPアンプの最大出力電圧が厳しくなってきます．

温度上昇を見る

予備実験が終わり，製作した回路に件の電源をつないだところ，12Vで10Aが出てくれません．8.2Aくらいで保護がかかってしまい電圧が落ちるのです．こ

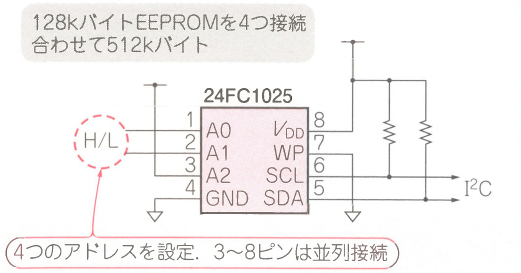
コラム　積み上げて容量を4倍に

試作回路だからできたことですが，**写真A**のようにしてI^2C接続のEEPROMの容量を増やしたことがあります．元々は128Kバイトの24FC1025を1つだけ実装していました．



写真A　4段重ねで容量4倍に

図Aのようにアドレス線のA_0とA_1を使えば，4倍まで容量を増やせます．別の場所にEEPROMを配置するより段重ねにすればA0，A1以外の6本は並列につなぐだけなので配線の手間が省けます．しかしDIPだとずいぶん背が高くなりました(ICソケットを含め約18 mm)．　**〈下間憲行〉**



図A　128 Kバイト EEPROMを4つ接続．合わせて512 Kバイト

表3　写真2に示す4点の温度の測定方法

Tr_6の表面温度	サーミスタのフイルムがTr_6の表面にくっつくように圧着端子で押さえ込む
Tr_5の表面温度	圧着端子の円筒圧着部にサーミスタを挿入して，シリコン・ゴムで固定し，これをTr_5にネジ止めする
ヒートシンク表面温度	Tr_5とTr_6の間にあるネジ穴に同じように作ったサーミスタを固定
電流検出抵抗 0.1 Ω 50W	抵抗の固定足にネジ止め

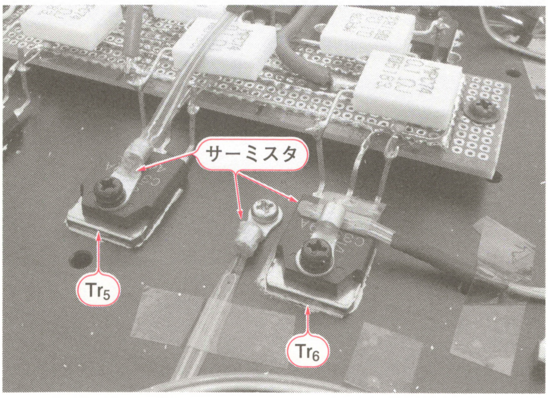


写真2　表3に示す4つのうち3つの温度測定点

の電源のスペックは「12 V・100 W」のようです．

気を取り直して温度を測ってみました．使用したのはフィルムではさみ込まれた103JTサーミスタです．応答性が良いのがお気に入りです．**表3**に示す4点の温度を**写真2**のようにして測りました．**図6**がその結果で，10分ほどで70 ℃に到達しました．ファンを回すとヒートシンクが徐々に冷えて，数分で全体の温度が30 ℃ほど低下しました．このくらいの電力になると，自然空冷では難しそうでファンが必須なようです．

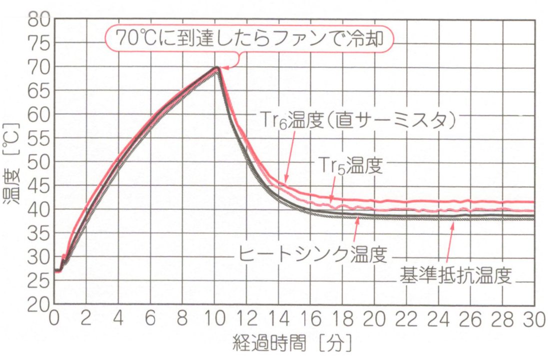
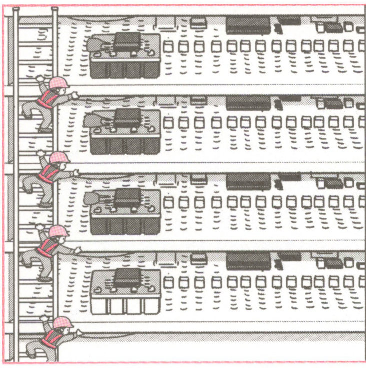


図6　100Wを消費させたときのサーミスタで計った各部の温度

◆参考文献◆

(1) 喜多村 守；実験室④電源性能丸わかり！電流スルーレート制御対応の電子負荷，3～40V/0～1A/0～40Wの直流をバッチリ吸い込む，トランジスタ技術，2015年1月号，p.123，CQ出版社．

下記リンクにて関連データ公開中です．
https://toragi.cqpub.co.jp/download2026/



第5章 現代回路のコモンセンス…並列分散処理コンピュータ入門

ラズパイPicoを8並列！手のひら映像処理スパコン

宮田 賢一 Kenichi Miyata

現代の計算機性能は並列処理に支えられています．ノード間の同期やタスク分割をハードウェア・レベルで体験する機会は多くありません．本稿では，ラズベリー・パイ Pico(以降Pico)を複数台使って，安価に並列分散処理の仕組みを再現します．

Picoは扱いやすく，多ノードの協調動作を直接観

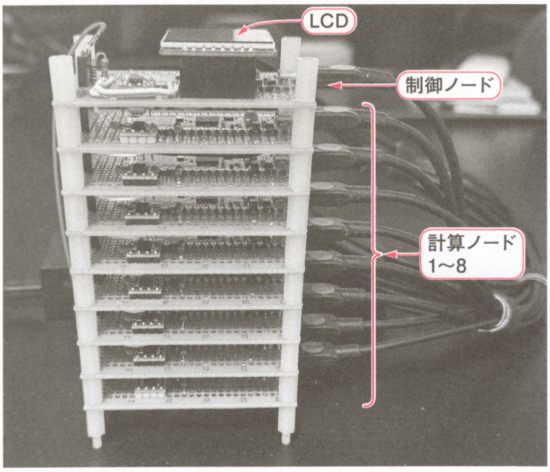
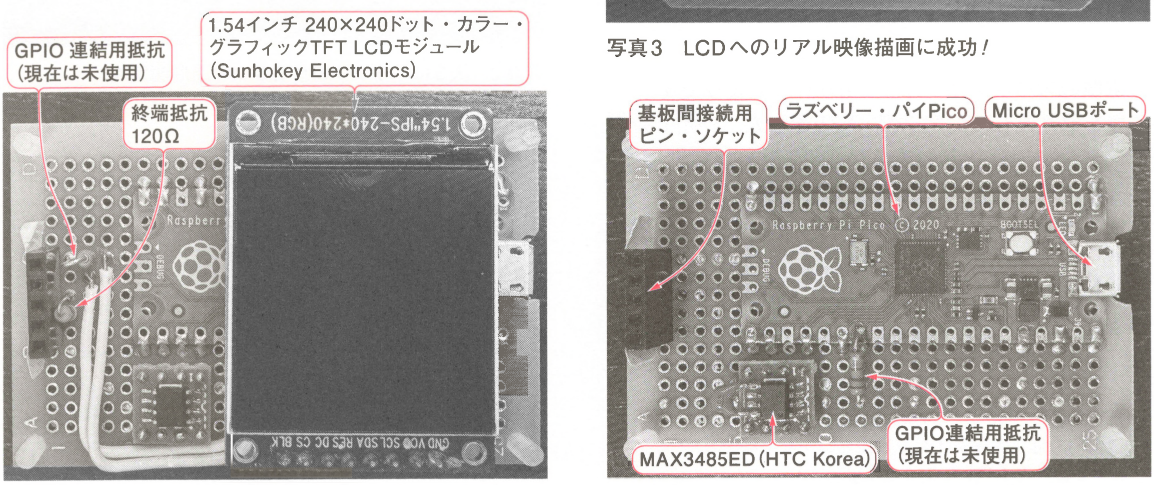


写真1　手のひらスパコン！ラズベリー・パイ Pico9枚で実現したリアル映像描画システム



写真3　LCDへのリアル映像描画に成功！



(a) 制御ノード　(b) 計算ノード

写真2　リアル映像描画システムは制御ノード1枚と計算ノード8枚で構成する

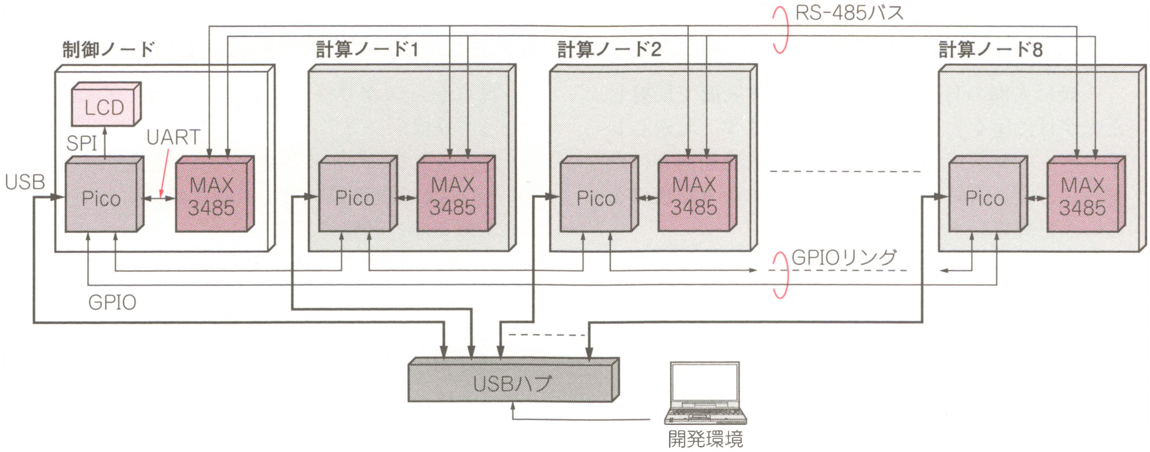


図1　手のひらスパコン！ Picoが8並列リアル映像描画システムのブロック

察できます．題材として各ピクセルを独立に計算できるレイ・トレーシング(コラム1参照)で，画像を領域ごとに分割して複数ノードで並列レンダリングを行います．

リアルタイム映像描画コンピュータのシステム構成と動作

● Picoを9枚(8並列＋1制御)連結

製作したリアル映像描画システムを**写真1**～**写真3**に，構成を**図1**に示します．Pico搭載の基板を9枚連結しており，それらは大きく分けて制御ノード1枚と計算ノード8枚に分けられます．ノード間の通信は，RS-485バスとGPIOリングで行います．GPIOリングは本システム独自のものとなるため，後ほど解説します．

個々のノードの構成としては，すべてのノードにRS-485のトランシーバICのMAX3485ED(HTC Korea)を搭載するほか，制御ノードには画像を表示するためのLCDを用意しました．さらに各ノード上のPicoからUSBを介して開発環境のパソコンとつなぎ，プログラムの書き込みやデバッグ用のメッセージ出力などをパソコンから行えるようにしています．

● 計算の範囲を分割して並列に計算

全体の動作概要を**図2**に示します．システム全体の統括は制御ノードが行い，計算ノードが実際の計算を行います．それぞれ順番に処理の流れを見ていきます．

▶［ステップ1］計算領域の分配

レイ・トレーシングで描画する領域を計算ノードと同じ数に分割し，RS-485バスを通して各計算ノードに配布します．配布するデータは，描画領域の左上の座標(x, y)と分割領域の幅w，高さhです．計算ノードはデータを受け取ると，制御ノードからの合図を待ちます．

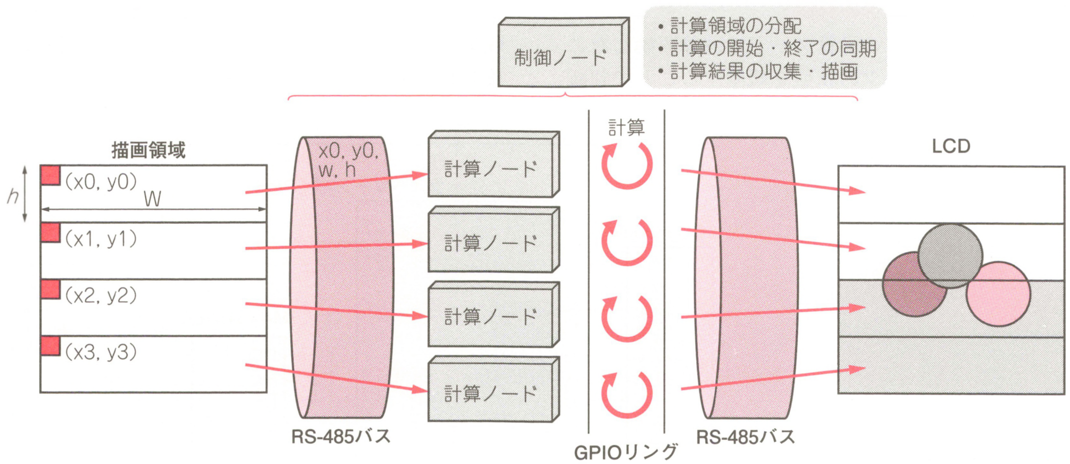
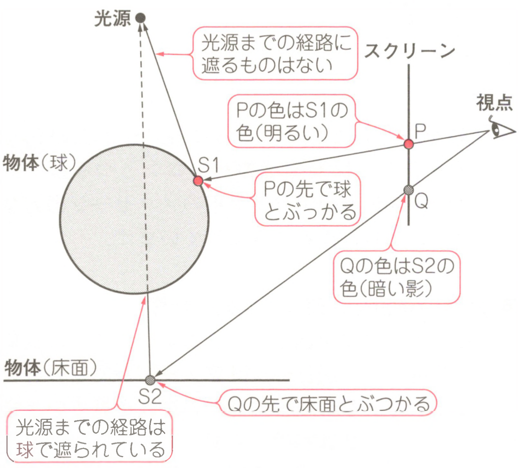


図2　リアル映像描画システムの動作イメージ

コラム1　計算量は多いけどピクセル別に計算できる…並列処理向きリアル映像描画レイ・トレーシング

一般に人間の目に入る光は,「物体表面で反射した光が目に届く」という経路を通ります.しかしレイ・トレーシングでは,この光の流れを逆向きにたどることで,画面上のピクセルがどのような色になるのかを計算します.

基本的な考え方を**図A**に示します.物体を見ている「視点」,見えているものを画像として投影する「スクリーン」,光を発する「光源」,空間内に存在する「物体」があるとします.



図A　レイ・トレーシングの基本的な原理

① 視点からスクリーン上の点に向けて光線(レイ)を飛ばす
② 光線の先でぶつかる物体上の点と色を求める
③ その点から光源に向けて直線を延ばす
④ 光源までの経路に遮るものがなければ,物体との交点は光が当たる点としてスクリーンに描画する
⑤ 光源を遮るものがあった場合,物体との交点は影にあるものとしてスクリーンに描画する

たとえば,スクリーン上の点Pの場合,光線は球と点S1でぶつかります.点S1から光源までの間に遮るものは無いため,点Pは点S1に光が当たっているものとして描画します.

それに対して点Qの場合,光線は床面と点S2でぶつかりますが,点S2から光源までの間に球が存在するため,点Qは点S2が影であるとして描画します.

よりリアルに描画する場合は,物体表面での反射,散乱,物体内への透過と屈折などを考慮してスクリーン上への描画色を決めていきます.

レイ・トレーシングの特徴は,光線の処理がピクセル単位で独立している点です.つまり10万個のピクセルがあれば,10万個の小さな演算問題が並んでいる構造になります.この性質は,本システムのような複数ノードによる並列演算と非常に相性が良いものです.　〈宮田 賢一〉

▶［ステップ2］計算開始の合図

制御ノードは,描画領域の情報をすべて送信し終わったあと,GPIOリングを通して全ノードに計算開始の合図を出します.これを受けて各計算ノードはレイ・トレーシングの計算を開始します.

▶［ステップ3］計算終了の確認

制御ノードはすべての計算ノードで計算開始したことを見届け(GPIOリングの状態を観測することで判断可能),計算ノードに対して計算完了を報告するようにGPIOリング上で指示を出します.各計算ノードは計算が完了し次第GPIOリング上で結果を報告します.

▶［ステップ4］計算結果の収集と描画

制御ノードがすべての計算ノードで計算終了したことを見届けたあと,計算ノードから順番に描画結果を収集し,LCD上に表示します.ここまでの流れで,1枚の画像を複数ノードで分担しつつ,一貫性のあるタ

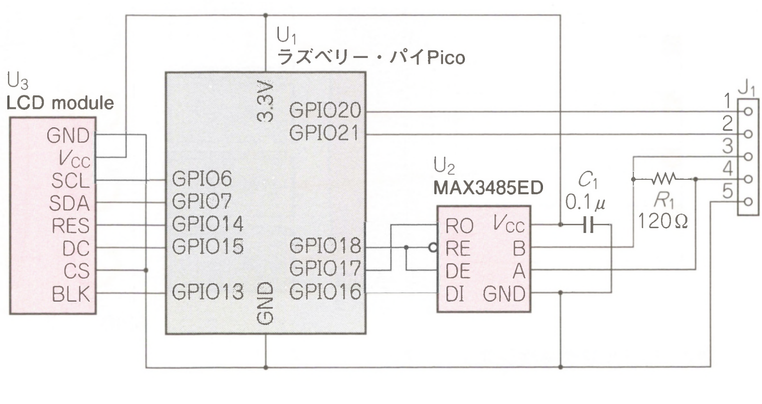
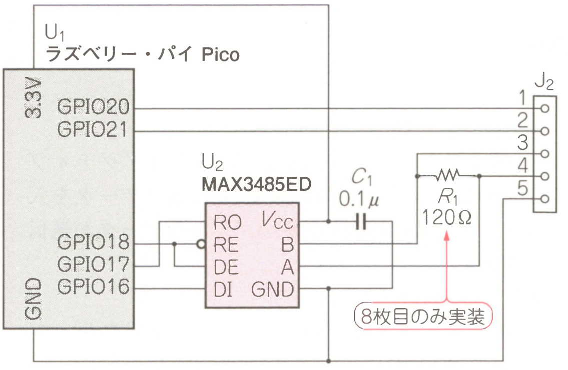
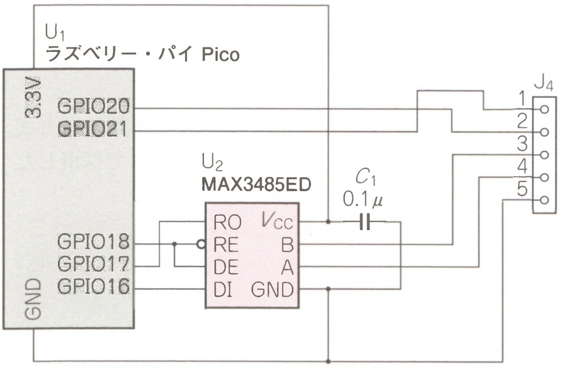


図3　リアル映像描画システム～制御ノードの回路



(a) 偶数のノード向け



(b) 奇数番号のノード向け

図4　リアル映像描画システム～計算ノードの基本回路

イミングで開始・終了させられます．

回路構成

制御ノードと計算ノードの動作がわかったところで，実際の回路構成を考えます．

制御ノード

制御ノードの回路を**図3**に示します．PicoはRS-485通信の機能を持たないため，RS-485トランシーバとしてMAX3485EDを使用します．これをPicoのUART用ピンとつなぎます(RS-485についてはコラム2も参照)．制御ノードはRS-485バスの終端にするので，A/B信号線間に終端抵抗も挿入します．

LCDとして，1.54インチ240×240ドット・カラーグラフィックTFT LCDモジュール(秋月電子通商)を使います．このLCDモジュールの制御チップは，ST7789で，多くの使用実績のある汎用的なものです．LCDモジュールがもつSPI信号線とバックライトやリセットなどの制御用の信号線をPicoにつなぎます．

GPIOリング用としてGPIO20(入力)とGPIO21(出力)を割り当て，他のノードのGPIO20およびGPIO21とつなぐようにします．

最後に，制御ノードを他のノードと接続するための5ピンのピン・ソケットを用いて，基板間をピン・ソケットにより直結できるようにしました．本来はRS-485通信にはツイスト・ペアのケーブルを使うべきですが，今回は通信路が短く外来ノイズの影響をある程度小さくできることから，ストレートなピンを使ってバスを構成しています．

計算ノード

計算ノードの基本回路を**図4**に示します．基本的な構成は制御ノードと同じで，LCDが無いところだけが異なります．**図4(a)**は，8個目の計算ノードを終端とするため終端抵抗が入っています．それ以外の計算ノード7枚ではこの抵抗を省略します．

計算ノードはピン・ソケットを使って縦に直結する都合上，GPIOの入力と出力が正しくつながるように，GPIO20とGPIO21に対するピン・ソケットへの割り当てを逆にした**図4(b)**の回路も用意します．

図4(a)と**図4(b)**のノードは，交互になるように積み重ね，最後のノードのGPIO21を最初のノードのGPIO20に接続します．これにより，すべてのノードでGPIOリングを途切れさせずに構成できました．

以上の回路をユニバーサル基板上に実装したのが，**写真2**になります．実験途中のハードウェアのデバッグ用途に，未使用の抵抗が実装されていますが，最終的に短絡して無効化しています．

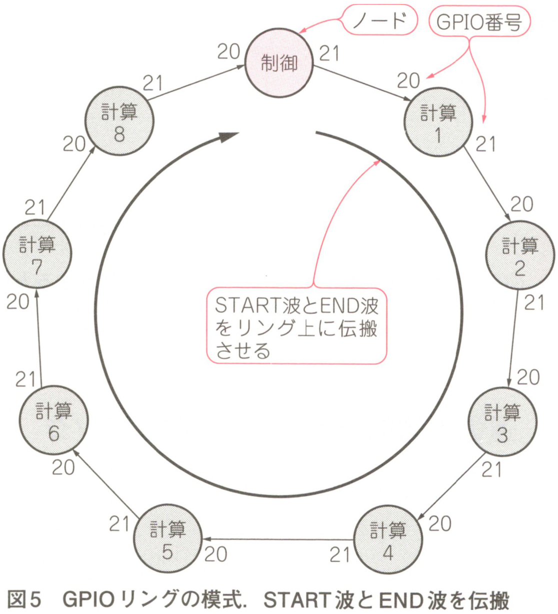


図5　GPIOリングの模式．START波とEND波を伝搬

コラム2　産業機器で使われる差動伝送方式RS-485

RS-485の特徴

RS-485は産業機器で広く使われる差動伝送方式の物理層です．今回製作した本システムで採用した理由は次の3点になります．

(1) 多ノード接続に適している
単純なUARTでは1対1接続が基本ですが，RS-485は複数ノードをバスへ並列に接続できる

(2) ノイズ耐性が高い
差動方式のためノイズに強く，長い配線でも安定する

(3) ハードウェア制御がシンプル
DE制御だけで送信権の切り替えが可能なため，RP2040のGPIOだけで制御できる

RS-485方式の通信を行うための送信回路(Driver)と受信回路(Receiver)を1つにまとめたICがRS-485トランシーバです．RS-485トランシーバを複数接続する構成を**図B**に示します．RS-485トランシーバには制御用の2本の信号線(RE，DE)と，データの送受信を行う4本の信号線(RO，DI，A，B)があります．

信号線の使い方

これらの信号線の基本的な使い方は次のとおりです．

▶データ送信時

DEをアクティブ(High)かつREを非アクティブ(High)にします．この状態でDIに送信データを入力すると，RS-485信号線(A, B)からデータが送信されます．

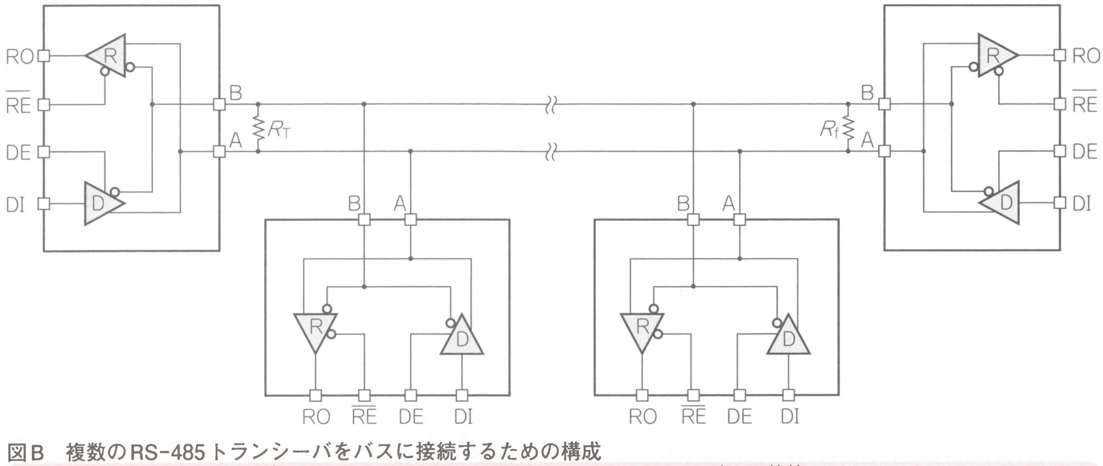
▶データ受信時

DEを非アクティブ(Low)かつREをアクティブ(Low)にします．この状態でRS-485信号線(A, B)からデータを受信するとROからデータが出力されます．

RS-485トランシーバ間の信号線は特性インピーダンスが120Ωであることが規格で定められており，そのためバスの両端となるトランシーバのA，B信号線間には120Ωの抵抗を挿入するようにします．

なおRS-485の通信路には2線式と4線式があります．2線式の場合は，送信と受信を同時に行えない半二重通信に対応します．4線式の場合は，送信と受信を同時に行える全二重通信が可能となります．本システムでは構成の簡単さを優先し，2線式・半二重で実装しています．

〈宮田 賢一〉



図B　複数のRS-485トランシーバをバスに接続するための構成
MAX3485EDのデータシート(https://akizukidenshi.com/goodsaffix/max3485.pdf)より抜粋

通信の同期の仕組み：GPIOリング

ノード間での処理の同期を行うために，ソフトウェアのみで実装するのではなく，ハードウェアと組み合わせて対応することにします．そこで今回実装したのがGPIOリングです．

GPIOリングの模式を**図5**に示します．GPIO20を入力，GPIO21を出力として，制御ノードの出力と計算ノード1の入力，計算ノード1の出力と計算ノード2の入力といった具合に，各ノードの出力と入力をつないでいきます．

最後のノードの出力を制御ノードの入力に戻すことで，ノード間(Pico間)がGPIOでリング状につながる

ことになります．このリング内のノードにおいて，次の処理を行います．

ノードの入力がHigh（またはLow）になったら，ノードの出力をHigh（またはLow）にする

ここで各ノードの出力（GPIO21）の初期状態がLowだったとして，最初に制御ノードが出力をHighにしたとします．すると計算ノード1は入力がHighになったので出力をHighにします．計算ノード2はこれを受けて，同様にGPIO21をHighにします．以下同様に伝播していくと，最終的に制御ノードの入力がHighになる，つまり制御ノードで設定した状態が，リングを通して全ノードに伝わることになります．この特徴を利用して，次の2つの「波」の伝播を考えます．

- START波：制御ノードがGPIO21をHighにすることで伝わる波．START波を受信した計算ノードは計算を開始し，次のノードに計算開始を伝える
- END波：制御ノードがGPIO21をLowにすることにより伝わる波．END波を受信した計算ノードは，自身の計算が完了していれば次ノードに「計算が完了したこと」を伝える

これらの波を使うことで，START波で全ノードの計算を開始し，END波で全ノードの計算完了を判定できるようになります．

ソフトウェア構成

ソフトウェアの構成について，考え方のポイントを記します．制御ノード・計算ノードともにMicroPythonを使って実装しました．

● ポイント1：内部フラッシュ・メモリへの一時保存

今回使用するLCDは240×240のピクセル数を持ち，1ピクセル当たり16ビットの値を取ることから，計算ノードが1つの場合に必要となるピクセル・データの合計は240×240×2＝約113 Kバイトとなります．

PicoのRAMは264 Kバイトですが，MicroPythonのファームウェア自体が使用する分を差し引くと，113 KバイトのデータをRAM上に確保できないことが実験で判明しています．そこで計算済みのピクセル・データはPico内部のフラッシュ・メモリにファイルとして書き込む方式にします．

● ポイント2：RS-485上での通信プロトコル

本システムのRS-485通信は，極力シンプルに保ちながらも，ノード間の正確な情報伝達を可能にするように設計しています．通信は主に制御ノードから計算ノードへの送信を起点とします．

RS-485上で送受信するデータ・フレームは，次の構造を取り，CRC16によって誤り検出を行います．

[ADDR（1バイト）][CMD（1バイト）]LENGTH（2バイト）][PAYLOAD（可変長）][CRC16（2バイト）]

ADDRには宛先ノードのIDを，CMDには命令の種類を表す1バイト値を格納します．LENGTHはPAYLOADのバイト数です．また通信路に混入するノイズでデータ化けする可能性を考慮し，CRC16（Cyclic Redundancy Check 16-bit）による誤り検出コードを追加しています．

ADDRに指定するコマンド一覧は次のとおりです．

- CMD_ASSIGN_TILE：計算ノードへのジョブの割り当て
- CMD_ACK：受信確認応答
- CMD_TOKEN：計算済みデータ送信要求
- CMD_TILE：計算済みデータの送信

● プログラム構成

本システムで使用するMicroPythonプログラム・ファイルを**表1**に示します．全体としては規模が大きくなっており，誌面の制約上すべてを掲載できないため，制御ノードと計算ノードのメイン処理から説明上必要な部分のみを抜粋したものを**リスト1**～**リスト3**に示します．

リスト1は制御ノードでのメイン処理です．LCDとRS-485，GPIOリングの初期化をした後，描画領域の分割，ジョブの開始，データ受信が大きな流れです．**リスト2**は計算ノードでのメイン処理です．基本的には制御ノードや他の計算ノードからのコマンド受信待ちループです．**リスト3**はGPIOリング上でのSTART波とEND波に対する処理を行います．

実験

Picoにプログラムを書き込んで，動かしてみます．

表1　リアル映像描画システムで使用するMicroPythonプログラム

ファイル名	格納場所	役　割
controller.py	制御ノード	制御ノードのメイン・プログラム
worker.py	計算ノード	計算ノードのメイン・プログラム
rs485stream.py	制御ノード 計算ノード	RS-485上での通信処理
gpio_chain.py	制御ノード 計算ノード	GPIOリングの処理
protocol.py	制御ノード 計算ノード	通信プロトコルのパラメータ情報
st7789sync.py	制御ノード	TFT LCDの制御
raytracer.py	計算ノード	レイ・トレーシングの処理

リスト1　制御ノードのメイン処理

```
async def start(assigned_ids):
    # LCDの初期化
    spi = SPI(0, baudrate=40_000_000, polarity=1,
              phase=1, sck=Pin(6), mosi=Pin(7),
              miso=Pin(4))
    lcd = ST7789(spi, LCD_W, LCD_H,
                 reset=Pin(14, Pin.OUT),
                 dc=Pin(15, Pin.OUT),
                 cs=Pin(5, Pin.OUT),
                 blk=Pin(13, Pin.OUT))
    lcd.backlight(True)
    lcd.clear(COLOR_BLACK);
           lcd.text("INIT", 10, 10); lcd.update()

    # RS485 / GPIOリングの初期化
    bus = RS485Stream(uart_id=0, tx=16, rx=17,
                      dir_pin=18, baudrate=100_000)
    chain = ChainIO(in_pin=20, out_pin=21)
    # タイル割当
    tiles = tiles_for_nodes(len(assigned_ids))
    # (1) ジョブの配布
    await assign_jobs(bus, assigned_ids, tiles)
    # (2) ジョブ開始からジョブ終了待ち。時間も計測
    span_ms = await gpio_measure_span(chain)
    # (3) データ送信要求
    token = bytes(assigned_ids)
    await bus.send_frame
              (assigned_ids[0], CMD_TOKEN, token)
    # (4) 順次受信・描画（トークンはworker間で勝手に回る）
    for tile in tiles:
        recv_and_draw_one(bus, lcd, tile,
                                timeout_ms=15000)
    # 実行時間表示
    print(f"SPAN: {span_ms} ms".format(span_ms))
    print("FRAME DONE")
```

リスト2　計算ノードのメイン処理

```
async def rx_loop(bus: RS485Stream):
    # コマンド待ちループ
    while True:
        fr = await bus.recv_frame(max_len=64)
        addr, cmd, payload = fr
        # 宛先=自分宛のみ受理(CMD_TOKENは
                      assignedのみが受ける設計)
        if addr != MY_ADDR:
            continue

        # ジョブ割り当ての受信
        if cmd == CMD_ASSIGN and len(payload)
                                     == 1 + 12:
            seq = payload[0]
            imgW, imgH, x0, y0, w, h = struct.
               unpack("<HHHHHH", payload[1:1+12])
            # 古いファイルを消す
            if tile_path: os.remove(tile_path)
            # 制御ノードにACKを返す
            await bus.send_frame(addr=addr,
                  cmd=CMD_ACK, payload=bytes([seq]))
        # データ送信要求受信
        elif cmd == CMD_TOKEN:
            ids = list(payload)
            # 自分の番：タイル送信
            header = struct.pack
                       ("<HHHH", x0, y0, w, h)
            total_len = 8 + 2*w*h
            # データ送信
            bus.send_frame_streaming_sync
               (MASTER_ADDR, CMD_TILE, total_len,
                                 header=header,
              chunk_iter=iter_lines_from_flash(),
                            interline_gap_ms=2)
            # 次ノードへトークン(データ送信が
                            必要なノード一覧)を渡す
            rest = ids[1:]
            if rest:
                await bus.send_frame(rest[0],
                          CMD_TOKEN, bytes(rest))
```

● ステップ1：プログラムの書き込み

開発環境のパソコンから各PicoにMicroPythonのファームウェアを書き込んでおきます．MicroPythonの最新版(本稿執筆時点でv1.26.1)は次のサイトから入手できます．

https://micropython.org/download/RPI_PICO/

本システム向けのプログラムを**表1**に従って，必要なものをPicoにアップロードします．アップロードにはThonnyなどのMicroPython対応のエディタを使っても構いませんが，筆者はmpremoteコマンドを使ってコマンド・ラインから実行しました．mpremoteはPythonが実行できる環境であれば開発環境上にpipでインストール可能です．たとえばPicoのシリアル・デバイス名が/dev/tty.usbmodem3131101(macOSの場合)に，controller.pyというファイルをアップロードするときは以下のコマンドを実行します．

```
mpremote connect /dev/tty.usbmodem
3131101 fs cp controller.py
```

リスト3　計算ノードでのGPIO処理

```
async def gpio_sync_loop(chain: ChainIO):
    while True:
        # START波待ち (3_600_000はタイムアウト時間)
        ok = await chain.wait_in_level
                              (1, 3_600_000)
        # START波を受信したら
                  次ノード向けにGPIOをHighにする
        chain.drive_high()
        # レンダリング開始
        await render_to_flash()

        # END波待ち
        ok = await chain.wait_in_level
                              (0, 3_600_000)
        # END波を受信したら次に渡す
        chain.drive_low()
```

● ステップ2：ノード識別情報の書き込み

各計算ノードに，自分自身の識別子情報を書き込みます．mpremoteコマンドを使う場合は次のようにします．

```
mpremote connect <Picoのデバイス名>
exec "open('id.txt', 'w').write('1')"
```

末尾のwrite('1')の数値部分を，ノード毎に1から8の数値で指定して，それぞれの計算ノードに対して実行します．

● ステップ3：計算ノードの開始

次に計算ノードの実行を開始します．各計算ノードから出力されるメッセージを同時に表示するために，シリアル・コンソールを8個開き，それぞれで次のとおり実行します．

```
mpremote connect <Picoのデバイス名>
exec "import worker as w; w.main()"
※<Picoのデバイス名>は，それぞれのPicoのシリアル・デバイス名で置き換える
```

実行を開始すると，パソコンのシリアル・コンソール上に，各計算ノードの識別子(id)を表示して，制御ノードからのジョブ投入待ちとなります．

● ステップ4：制御ノードからジョブを投入

ここまでできたら，最後に制御ノードから計算ノードに対するジョブを投入します．

```
mpremote connect <Picoのデバイス名>
exec "import controller as m; m.main([1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8])"
```

mainに渡すリストは，ジョブを実行する計算ノードの識別子を列挙したものです．特定のノードだけで実行したい場合は，必要な識別子のみ指定します．

● 実行結果

ジョブを投入すると，各計算ノードでレイ・トレーシングの計算処理が始まり，最終的に制御ノードのLCDに描画結果を表示します(**図6**，**写真3**)．

レイ・トレーシング処理を実行する計算ノードを変えてみて，レンダリング処理の実行時間を比較したものが**図7**です．この実行時間は計算を開始してから終了するまでのもので，制御ノードがデータを集め描画する部分の時間は含みません．

この結果から，ノード数を増やすと実行時間が短縮されることがわかります．ただしノード数が8倍になったからといって実行時間が1/8倍になるわけではなく，約1/6(102.3÷17.2)倍になっています．これは分割した描画領域ごとに計算量が異なり，描画領域内にある物体が複雑で計算処理に手間がかかるノードの計算時間に律速された結果と考えられます．

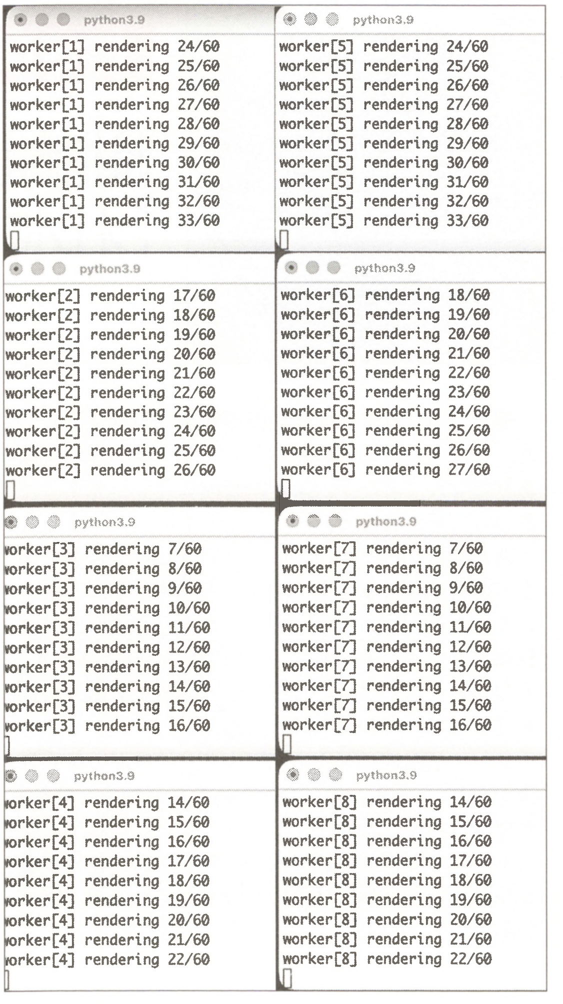


図6　各計算ノードでの実行のようす

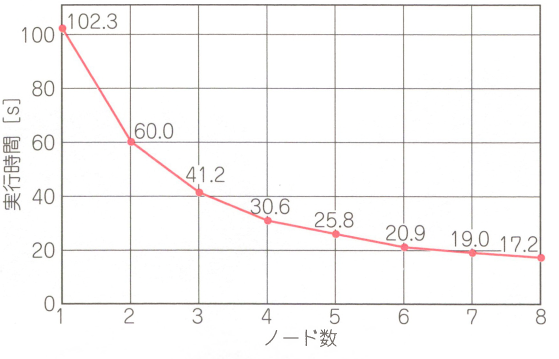
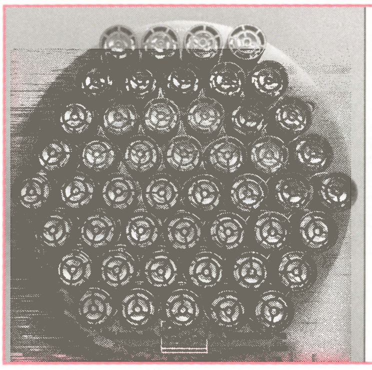


図7　ノード数に対する計算時間の変化

● 応用のヒント

RS-485の代わりにCANやイーサネットを使った構成に変更し，物理層・プロトコルを比較する応用も考えられます．ぜひ並列計算の世界を試してください．

下記リンクにて関連データ公開中です．
https://toragi.cqpub.co.jp/download2026/



読者プレゼント p.36

第6章 超音波振動子アレイを制御すると空中から不思議な音が鳴るのだ

超指向性スピーカ！「オレにしか聞こえない目覚まし時計」

宮村 智也 Tomoya Miyamura

筆者が単身赴任していた頃の住処は集合住宅でした．住んでいた部屋の壁はとりたてて薄いわけではありませんでしたが，隣家から聞こえる目覚まし時計の音で目が覚める，ということが度々ありました．

確実に目覚めるためには，目覚まし時計にもそれなりの音圧が必要です．ですが可聴音はどちらかといえば無指向性に近い性質ですから，音圧が大きければ遠くまで，かつ四方八方に音が鳴り響きます．もしかしたら，自分の目覚まし時計の音で隣人が目を覚ましていたかもしれません．

もし，指向性が強く音が四方八方に広がらない音源があれば，「オレにしか聞こえない目覚まし時計」ができるのではないか，と考えました．これをアラームの音源とすれば，隣人に迷惑をかけない目覚まし時計ができるのではないか……というのが，実験の動機です．

オレにしか聞こえない超指向性目覚まし時計の構成

● マイコン・ボードはIchigoJam

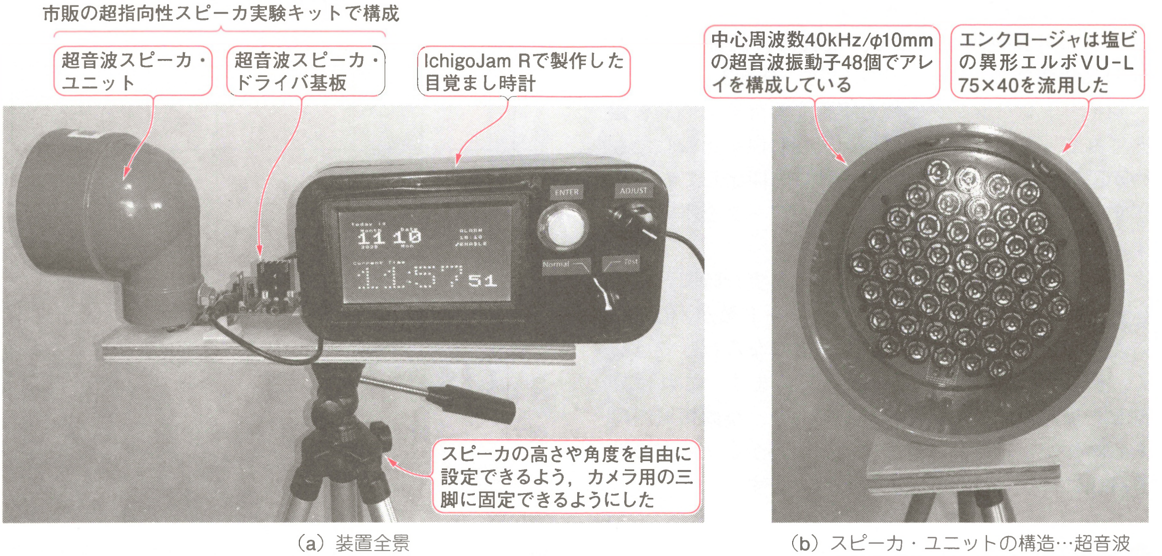
製作した「オレにしか聞こえない目覚まし時計」を**写真1**に示します．

目覚まし時計部は，大きめの液晶ディスプレイが利用しやすいマイコン・ボードのIchigoJam-Rで作りました．

鋭い指向性を持つスピーカとして「パラメトリック・スピーカ」が知られています．アラーム音源にはパラメトリック・スピーカの市販キットを使用して，四方八方に広がらないアラーム音を実現します．

● キー・デバイス…超指向性をもつパラメトリック・スピーカの入手について

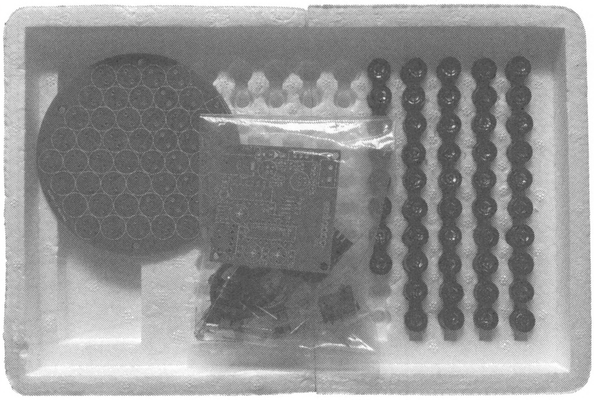
パラメトリック・スピーカの有名なキットとして，トライステートが製造していた「パラメトリック・ス



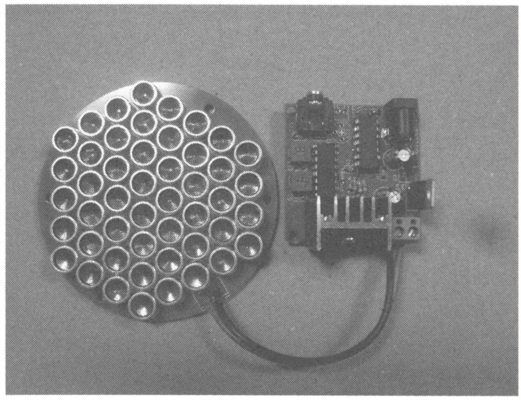
(a) 装置全景

(b) スピーカ・ユニットの構造…超音波振動子がアレイ状に並んでいる

写真1　超指向性スピーカ制御…オレにしか聞こえない目覚まし時計
JA7TDO/三浦一則氏のパラメトリック・スピーカ実験キットにIchigoJam Rで作った目覚まし時計を組み合わせて構成した



(a) 組み立てキット．振動子の高さを揃えなければならないため，ある程度の工作技術を要する



(b) 組み立て済みキットも用意されている

写真2　指向性の制御に使ったアレイ・スピーカ
JA7TDO/三浦一則氏の「パラメトリック・スピーカ実験キット」．以前は有名なキットもあったが，現在(2025年11月執筆時点)では，筆者が探した限りでは唯一のパラメトリック・スピーカの組み立てキット．eBay経由で購入できる[eBay商品番号：197128425281．約13,920円＋送料(2025年11月確認)]．三浦氏のご厚意により同キットを抽選でプレゼント！ 詳細はp.36

ピーカ・キット」が知られていました．しかし，同社は残念ながら2024年に事業を終了してしまいました．販売元の1つであった秋月電子通商も，記事執筆時点(2025年11月)で販売終了となってしまいました．

パラメトリック・スピーカの完成市販品は10万円以上となり，気軽に試すには高価です．廉価で動作実績があり，装置構成や動作がわかるものを採用したかったので，別のパラメトリック・スピーカのキットを探すことにしました．

トライステートのキットに代わるものを探したところ，JA7TDO/三浦一則氏がeBayを通じて頒布するパラメトリック・スピーカ実験キット(eBay商品番号：197128425281)に行き当たりました．四方八方に音が広がらない音源として，このキットを使用することに決めました．**写真2**にパラメトリック・スピーカ実験キットを示します．

超指向性を実現できるアレイ状パラメトリック・スピーカのメカニズム

● どうして自分にだけ聞こえるのか？

パラメトリック・スピーカは，「空気中で音を発生させるスピーカ」です．通常のスピーカは可聴周波で振動板(コーン紙など)を振動させ，その振動で空気を震わせて可聴音を生成します．これに対し，パラメトリック・スピーカは，スピーカの表面から離れた空間中に可聴音を生成します．スピーカ本体から可聴音が出るのではなく，空中から音がにじみだす，といった表現があてはまります．可聴音の発生源は物理的な振動板ではなく，**図1**に示すように空間中に直線的に配置される「目に見えない仮想の音源の集まり(＝仮想音源)」としてモデル化されます．このような音源を「パラメトリック音源」とよび，パラメトリック音源を生成するスピーカを「パラメトリック・スピーカ」と呼びます．

● その音は，まぼろし〜!?　超音波が自己復調で，空中に仮想音源ができる

パラメトリック・スピーカが直接発するのは，ヒトには聞こえない超音波です．可聴音で変調した超音波を，110 dBを上回るような音圧で空気中に放射します．このような大きな音圧で発せられた超音波は，伝搬の過程で空気の非線形性(圧力変化と体積変化の関係が比例の関係にならない)の影響を受けます．

この影響の結果，変調された超音波はその伝搬過程

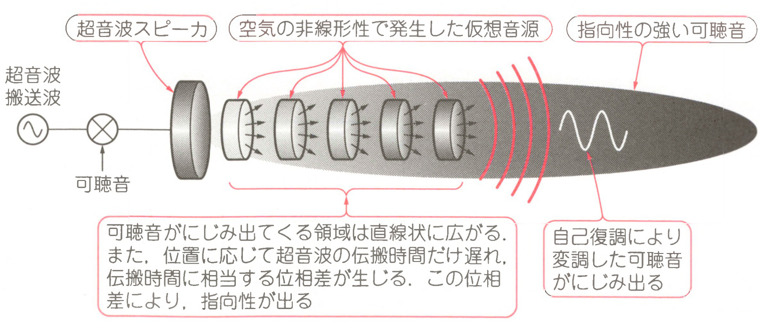
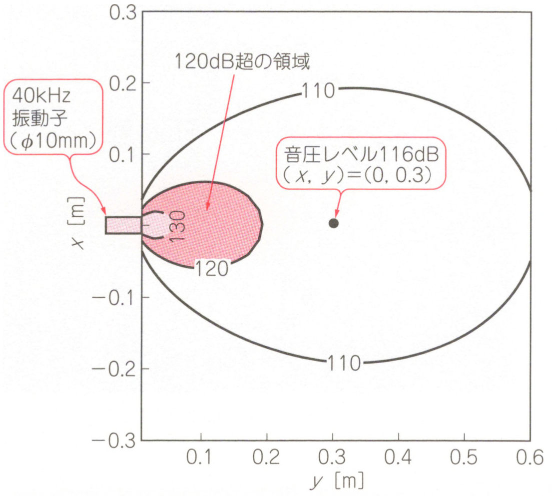
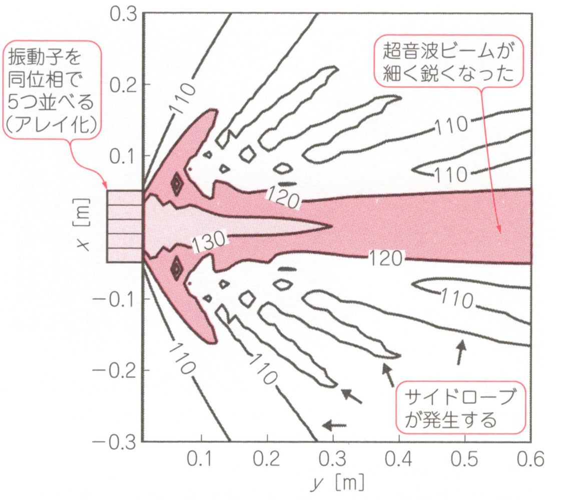


図1　パラメトリック音源の考え方(1)(2)
可聴音で変調した超音波を大きな音圧で発すると，空気の非線形性によって指向性の強い可聴音が生じる



(a) 超音波振動子単独の場合の音圧分布例



(b) (a)の振動子をアレイ化した場合の音圧分布例

図2 超音波振動子をアレイ化したときの効果[3]
超音波スピーカを平面上に並べてアレイ化すると，単独で使用するよりも強い指向性が得られる

で「自己復調」を起こし，可聴音を生成します．また，この可聴音は，**図1**に示すように空間中に直線的に配置される「目に見えない仮想音源の集まり」から出ているとみなせます．

● 指向性をより鋭くするために…超音波振動子を複数まとめて「アレイ」にする

一般に音源の指向性は振動面(音源)のサイズと音の波長によって決まります．超音波の波長は，例えば40 kHzのとき8.5 mmと短いため，指向性は可聴音より鋭い性質を元々持っています．複数の超音波振動子を**写真1(b)**に示すように平面上に並べて，振動子アレイを構成します．それぞれの振動子から同位相で超音波を発すると，振動子アレイは大きな振動面を持った1個の超音波振動子として機能します．

振動子アレイを構成することで，扱う超音波の波長に対して等価的に十分大きな振動面を作れます．こうして，もともと指向性の強い超音波の指向性をさらに強め，**図2**に示すような「超音波のビーム」を作ることができます．

こうして作った超音波ビームの中に「自己復調」によって生じた可聴音は，超音波ビームと同じ方向に進みます．結果，可聴音が出るのは振動子アレイ前方の空中に，しかも可聴音が広がらず細いビーム状に伝わるという現象が起こります．以上のようなメカニズムで，パラメトリック・スピーカは「スポットライトのように指向性の強い可聴音」を出すことができます．

パラメトリック・スピーカ部の組み立て

● キットの回路構成

図3にパラメトリック・スピーカ実験キットの構成を示します．

TL494(テキサス・インスツルメンツ)はパルス幅変調(以下PWMと略)に必要な機能が詰め込まれた，主に電源回路の制御に用いられています．TL494は2つのエラー・アンプ，のこぎり波発振器，PWMコンパレータを内蔵しています．キットではエラー・アンプは使用せず，音声信号をPWMコンパレータに直接入力してPWM信号を生成しています．

4069(東芝デバイス＆ストレージ)は6回路のインバータ(NOT回路)を内蔵するCMOS標準ロジックICで

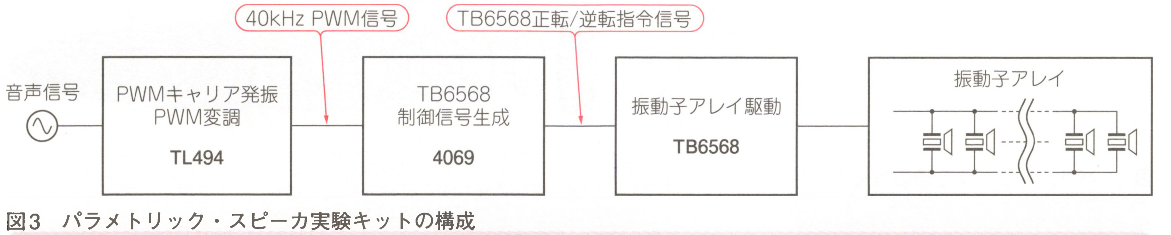
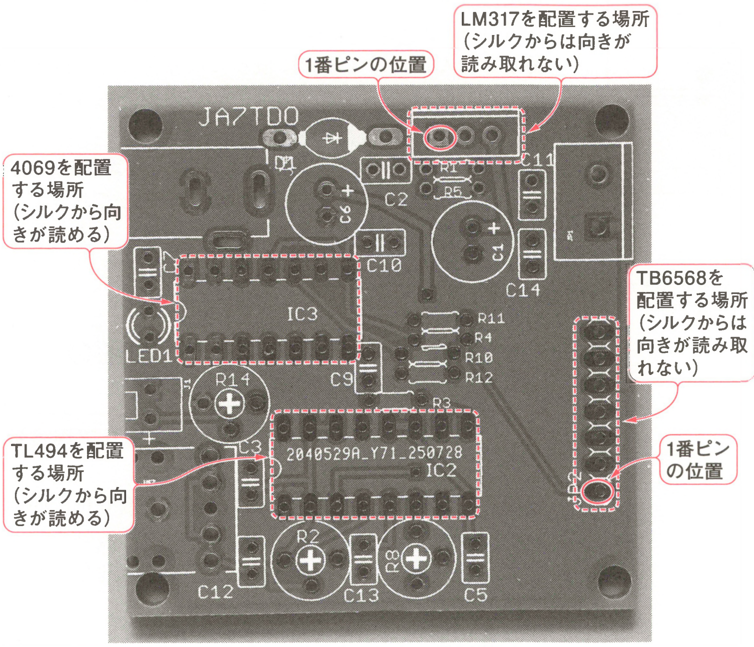
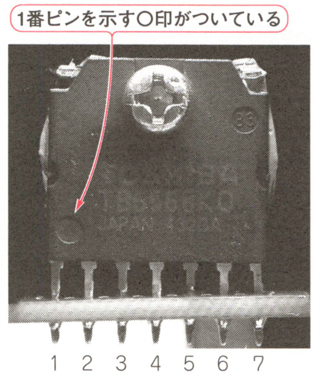


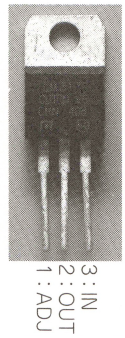
図3 パラメトリック・スピーカ実験キットの構成
電源制御用ICのTL494でPWMキャリアの発振とPWM変調を行い，DCモータドライバICのTB6568で発振子アレイをドライブする



(a) キットのドライバ基板(シルク面)



(b) TB6568のピン配置



(c) LM317のピン配置

写真3　パラメトリック・スピーカ実験キットのドライバ基板
LM317とTB6568の配置に際しては，回路図と基板のパターンチェックで向きを特定した

す．キットではこのうちの2回路のインバータを用いて，PWM信号をTB6568の正転/逆転の制御信号に変換しています．

TB6568(東芝デバイス＆ストレージ)は，MOSFETのフル・ブリッジを出力段に備えたDCモータ・ドライバICです．フル・ブリッジですから，負荷にDCモータを接続すればモータ正転/逆転の運転切り替えができます．キットでは負荷が超音波振動子アレイとなります．フル・ブリッジ出力段のおかげで，超音波振動子には電源電圧の2倍の振幅を持つ矩形波を供給できます．

TL494で生成されたPWM信号は4069でTB6568の正転/逆転信号に変換していますが，TB6568にはデッド・タイム生成回路が内蔵されていますので，インバータ2個で構成する簡素な信号変換でも，上下アーム短絡を気にする必要がありません．

キットの信号生成部(TL494，4069の周辺回路)は，可変3端子レギュレータのLM317から12 VDCを得て動作します．TB6568にはキットの電源入力端子から直接電源が供給されています．LM317は出力電圧プラス3V程度の電源電圧が必要ですので，少なくとも15 VDC以上の電源を供給する必要があります．キットでは15～19 VDCを推奨しています．

● 組み立ての要点その1：説明書の写真に頼らず，回路図と現物でICの向きを確認する

キットには組み立て説明書が付属しますが，部品表と回路図，調整法が簡単に記載されているだけです．部品名と部品の外観，部品の極性有無，ICピンの付番ルールなど，電子部品に関する基本的な知識がある人向けの内容となっています．また，回路の調整にはオシロスコープが必要です．

基本的には部品表を参照し，該当する部品を基板のシルク印刷を頼りに取り付けていけば基板が完成します．

TL434と4069は，**写真3**(a)に示すようにICの向きを示すシルク印刷が基板にありましたので，取り付け方向で悩むことはありませんでした．しかしLM317とTB6568はシルク印刷からその向きを筆者は読み取ることができませんでした．

説明書の写真を頼りにしようかとも思いましたが，説明書の写真と**写真3**(a)の基板(手元の実物)とではロット違いによるものでしょうか，シルク印刷が若干異なっていましたので，回路図をみながら基板のパターンをテスタでチェックし，ICの向きを特定しました．

● 組み立ての要点その2：振動子アレイは振動子の極性と高さをそろえる

超音波振動子をアレイにして動作させるとき，それ

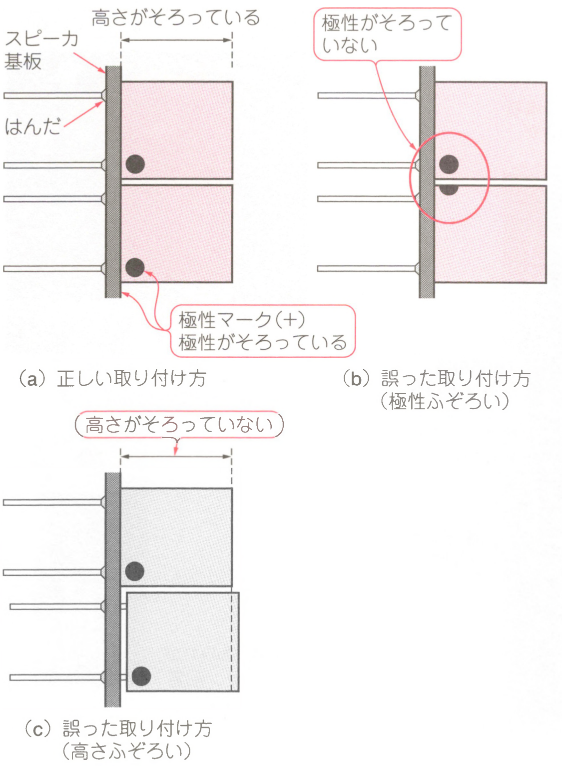


図4　超音波振動子の基板への取り付け注意点(4)

振動子から出る超音波の位相をそろえるため，①振動子の極性をそろえる　②振動子の高さをそろえる　の2点に気を付ける

ぞれの超音波振動子からは同位相で超音波を発生させる必要があります．超音波振動子はすべて並列に接続しますので，極性を間違えないように基板に取り付ける必要があります．極性を間違った場合，間違った極性の振動子からは逆相の超音波が発せられて正しい極性の振動子から出た超音波を打ち消してしまい，アレイ全体としては音圧が下がってしまうからです(4)．

図4に超音波振動子の取り付け注意点を示します．超音波振動子を基板に取り付ける際は，**図4(a)**に示すように基板からの高さをそろえる必要があります．40 kHzの超音波の波長は8.5 mmと短いため，振動子の高さがそろっていないと超音波の位相ズレによりアレイ全体としての音圧を下げる要因となる(4)からです．

● 超音波振動子を，要点をおさえて取り付ける

図4で示した要点を押さえながら，**写真4**に示すように振動子アレイを組み立てました．

写真4(a)に示すように，超音波振動子のリード線側には，リード線のプラス極を示す「+」のマークが入っています．基板側は**写真4(b)**で示すように基板のランドの形状で極性がわかるようになっていますので，振動子のプラス極が基板の四角いランドに合うように振動子を基板に配置します．

振動子の高さをそろえるために，まずは**写真4(c)**に示すように，基板の四隅に振動子をはんだ付けしました．はんだ付けをする際は基板のシルク面（部品取り付け面）を下にしてはんだ付けしますが，残りの振動子をはんだ付けする際に最初に取り付けた四隅の振動子が「足」になって，振動子の高さがそろうだろうと考えたからです［**写真4(d)**］．

なお，振動子をはんだ付けした際，**写真4(e)**に示すように振動子のリード線は切断せず残しておきます．装置の動作中，振動子はそれなりに発熱します．余分なリード線にヒート・シンクの役割を期待(4)して残すことにしました．

パラメトリック・スピーカ部の調整&動作確認

● ドライバ基板の動作確認・PWMキャリア周波数とデューティ比の調整

ひととおり組み立てが終わり，部品の取り付け間違いがないか確認した上で，動作チェックと調整を行います．動作確認時の接続とドライバ回路出力波形を**写真5**に示します．

写真5(a)に示すように，ドライバ回路をまずは無信号・無負荷で動作させて，スピーカ出力端子に現れる波形をオシロスコープで観察します．回路が正常に動作していれば，**写真5(b)**に示すように電源電圧の2倍の振幅をもつ矩形波が観測できます．この矩形波がPWMキャリアになります．

電源電圧の2倍の振幅の矩形波が確認できたら，最初にPWMキャリア周波数を調整します．基板上のPWMキャリア周波数調整VRを回して，矩形波の周期が25 μsecになるように調整します．オシロスコープに周波数の表示機能があれば，周波数が40 kHzになるように調整してもよいでしょう．

PWMキャリア周波数の調整が済んだら，パルス幅調整VRを回して矩形波のデューティ比が50 %になるように調整します．デューティ比の調整はそれほど厳密でなくてかまいません．

● 音声信号を入力してデューティ比が変化することを確認する

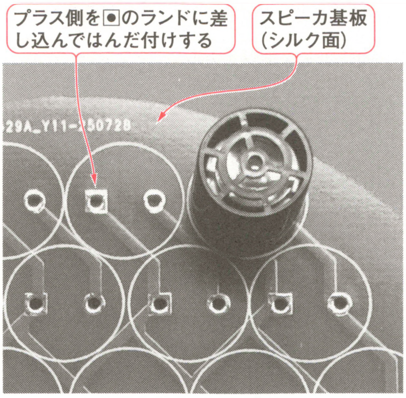
PWMキャリア周波数とデューティ比の調整が終わったら，ドライバ基板に2 V_{p-p}程度の音声信号を入力して波形を観察します．音声信号に応じてパルスの幅が変化し，パルス幅が飽和しなければ調整終了です．

● 超音波スピーカ・ユニットを接続して音を聴く

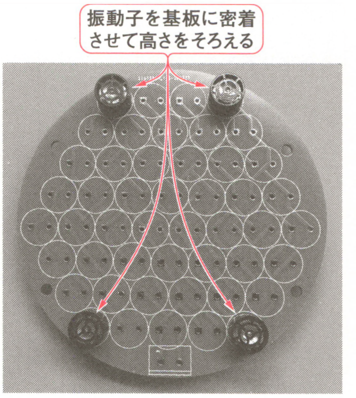
電源を切った状態で超音波スピーカ・ユニット（組み立てた振動子アレイ基板）をドライバ基板に接続します．超音波スピーカ・ユニットそのものに極性はあ



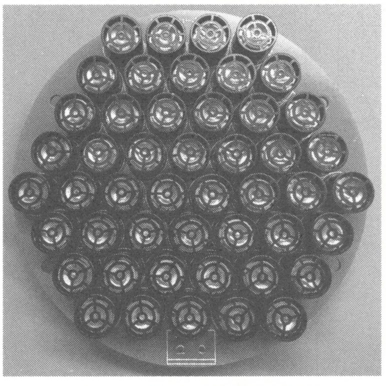
（a）振動子の極性判別



（b）ランドの形状で極性を識別する



（c）高さをそろえるため，最初に基板の四隅に振動子をはんだ付けする


（d）平らな台の上で残りの振動子をはんだ付けする

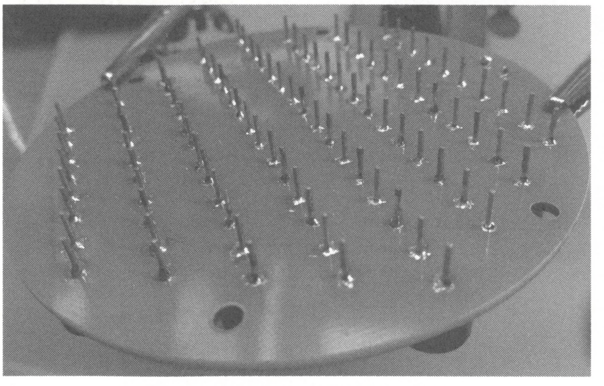
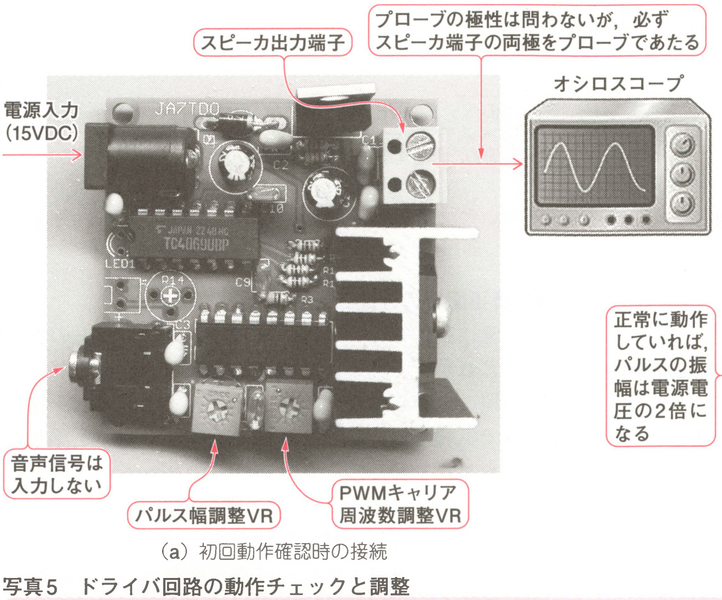
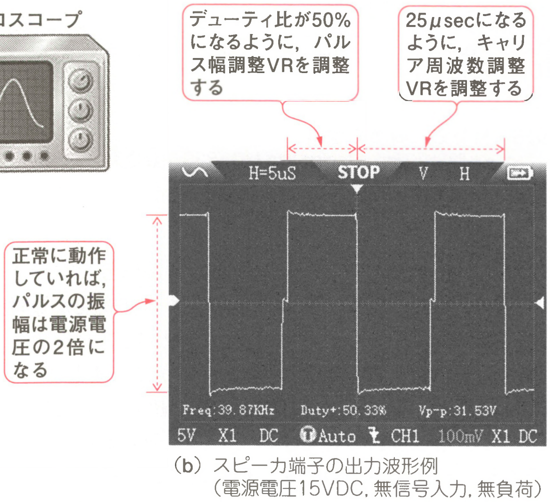

（e）振動子の余分なリード線は切断せず残しておく（振動子の放熱を期待できる）

写真4　超音波振動子アレイの組み立て
振動子の極性と高さがそろうように注意しながら組み立てる．振動子の放熱性に期待し，余分なリード線は切断せず残す



（a）初回動作確認時の接続



（b）スピーカ端子の出力波形例（電源電圧15VDC，無信号入力，無負荷）

写真5　ドライバ回路の動作チェックと調整
ドライバ回路を無信号/無負荷で動作させて波形をみながら調整する

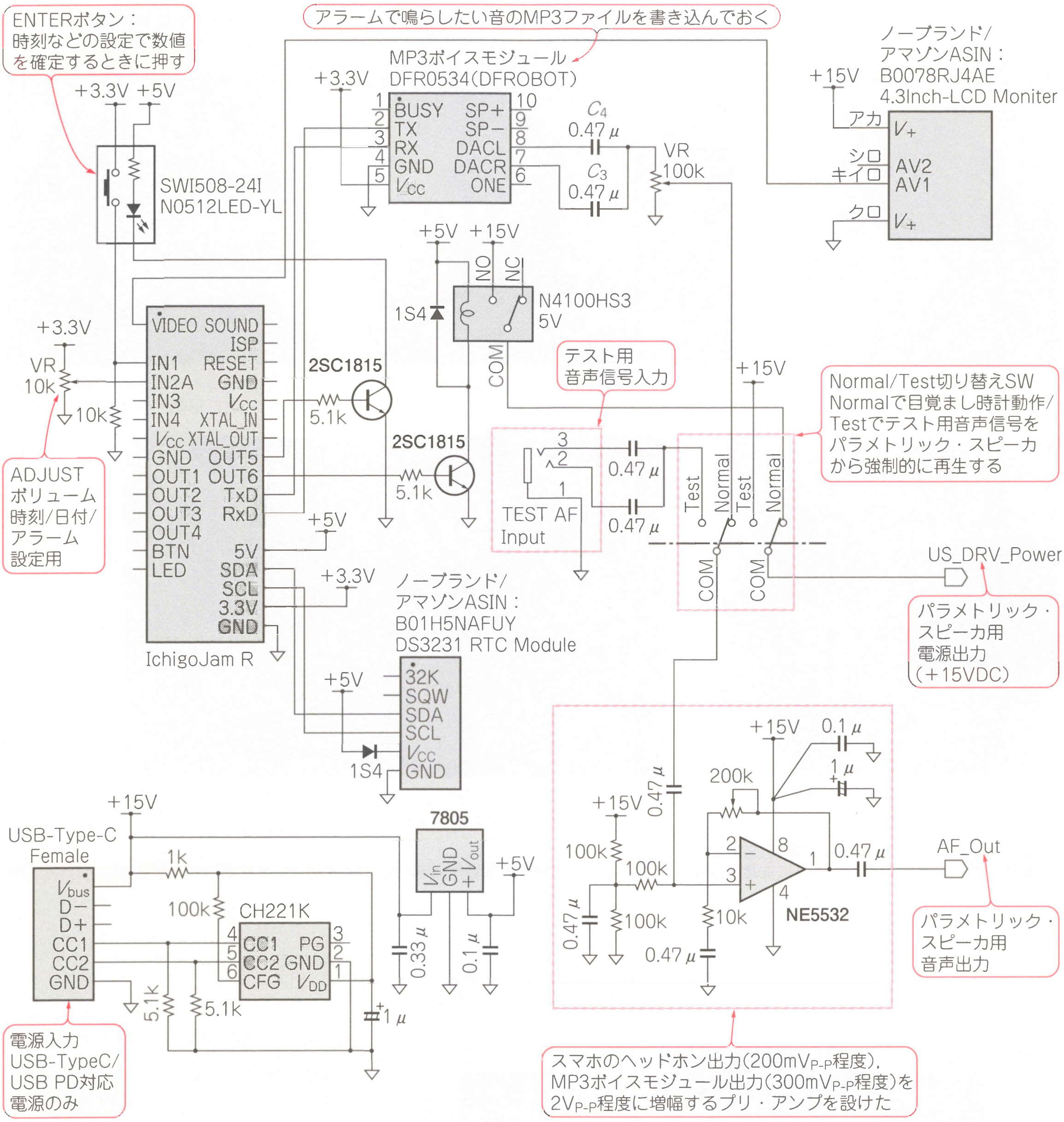


図5　目覚まし時計の回路
アラーム時計の機能はIchigoJamとDS3231 RTCモジュールで構成．パラメトリック・スピーカ用の電源も目覚まし時計から供給する

りません．

接続が完了したら，2 $V_{p\text{-}p}$程度の音声信号をドライバ基板に入力して電源を入れます．すべて問題がなければ音が聞こえてくるはずです．このとき，スピーカ・ユニットにあまり耳を近づけないようにしましょう．スピーカ・ユニットからは110 dBを超える大音圧で超音波が発せられていますので，耳に何らかの影響がでるかもしれないからです．何も聞こえないときはすぐに電源を切って不具合の原因を探してください．

● 真正面でのみ聞こえる，不思議体験！

正常に動作していれば，スピーカ・ユニットの真正面だと音がよく聞こえますが，ちょっと脇にそれると音が聞こえづらくなるのが体感できます．また，狭い部屋で実験しているとそれほど指向性が強いと感じないかもしれません．これは超音波のビームが部屋の中を反射しているせいです．よく聞いてみると，スピーカが向いている方向の壁から音が出ているように感じられます．スピーカを壁に向けると壁から，天井に向けると天井から，音が出ているように感じられるでしょう．

リスト1　時計本体のプログラム(1024バイト)

「SAVE 0」でIchigoJam本体に0番のプログラムとして保存する

```
10 @ARUN:CLS:CLT:K=60:M=24:LC0,1:?"Today is":LC2,3:?"Month":LC11,3:?"Date"
20 LC0,13:?"Current Time":LC24,4:?"ALARM":LC12,16:?CHR$(136):LC12,19:?
CHR$(136)
40 GSB170:S=[9]:B=1:H=51:V=36:GSB190:E=[7]*100+[8]:G=[0]*100+[1]:LC24,6:?
DEC$([0],2);":";[1]/10;[1]%10:IFIN(1)LRUN2
50 LC23,8:IF[2]=0?"DISABLE"ELSEIF[2]=1?"♪ENABLE"
60 IFTICK()<3600 [2]=0
70 IFE=GAND[2]=1LRUN3
80 IFK<>[8]GSB120
90 IFM<>[7]GSB130
100 IFL<>[5]GSB140
110 GOTO40
120 S=[8]:B=2:H=13:V=15:GSB190:K=[8]:RTN
130 S=[7]:B=2:H=0:V=15:GSB190:M=[7]:RTN
140 LC2,8:?"20";DEC$([3],2):LC11,8:IF[6]=1?"Sun"ELSEIF[6]=2?"Mon"ELSE
IF[6]=3?"Tue"ELSEIF[6]=4?"Wed"ELSEIF[6]=5?"Thu"ELSEIF[6]=6?"Fri"ELSEIF[6]=7?
"Sat"
160 S=[4]:H=2:V=8:B=1:GSB190:S=[5]:H=18:V=8:GSB190:L=[5]:RTN
170 POKE#700,0:IF I2CR(#68,#700,1,#701,10) E
180 FORI=0TO9:[I]=PEEK(#70A-I):[I]=[I]>>4*10+[I]&15:NEXT:RTN
190 X=H:N=0:IFB=1 D=7 ELSE D=6
200 [10]=S/10:[11]=S%10:FORT=10TO11:C=[T]+48:GSB220:N=N+1:X=X+
(N*D):NEXT:N=0:X=H:RTN
220 Y=V:FORI=0TO7:FORJ=0TO7:DRAWX*B+J*B,Y*B+I*B,PEEK(C*8+I)>>(7-
J)&1:NEXT:NEXT:RTN
```

屋内での実験で指向性がそれほど感じられないときは，超音波を反射する物体が近くにない屋外の場所で実験をしてみてください．屋外ではパラメトリック・スピーカの鋭い指向性をうまく体感できます．

目覚まし時計部の回路

大きめのLCDに時計を表示

パラメトリック・スピーカを音源とする目覚まし時計をIchigoJamで仕立ててみました．IchigoJamは比較的大きな液晶ディスプレイに，簡単に文字等を表示できるので，視認性のよい時計を作るのに好都合と考えました．今回は4.3インチの液晶ディスプレイを時計表示部に使用しました．このディスプレイはアマゾンから1,600円(ASIN：B0079RJ4AE；2025年11月確認時)ほどで購入できるので，こうした工作で気軽に使うことができます．

時計の機能はDS3231 RTCモジュールにお任せ

時計そのものの機能はDS3231を使用したRTCモジュール(ノーブランド/アマゾンASIN：B01H5NAFUY)に担わせ，IchigoJamには画面の表示，アラーム時刻の設定などの操作入力，アラーム作動時のMP3プレイヤの起動コマンド送出の機能を割り振りました．

図5に製作した目覚まし時計の回路を示します．

制御マイコンIchigoJamとプログラム

IchigoJamは，プログラム・メモリが1キロバイトと限られています．また，IchigoJam本体には最大1キロバイトのプログラムを4本保存できます．これら本体に保存されたプログラムは，他のプログラムから呼び出して実行することができます．

このため，目覚まし時計に求められる機能を4つに分けてプログラムしました．時計表示のプログラムをメイン・ルーチンとし，時刻設定，アラーム設定，アラーム鳴動の各プログラムはサブ・ルーチンとして用意して，必要に応じてメイン・ルーチンから呼び出す構成にしました．**リスト1～4**に目覚まし時計のプログラムを示します．

IchigoJamの選択肢…LPC1114でも動くけどオススメはRISC-V搭載のR

今回作成したプログラムは，IchigoJam BASIC Ver1.4.3(LPC1114系IchigoJam用最新版)とVer1.5.0(RISC-V系IchigoJam用最新版)で動作を確認しました．LPC1114系IchigoJamでは倍角文字の更新に時間がかかり，味はあるものの秒の表示がイマイチでした．より高速なRISC-V採用のIchigoJam Rではそのような問題は起こりませんでした．

超音波振動子を並べた目覚まし時計の実験&課題

超音波振動子をアレイにすることで，指向性を強めることが体感できた

製作した目覚まし時計を動かしてみました．ヒトには本来聞こえない超音波から指向性の強い可聴音が得られます．このためには超音波振動子をアレイ化して「超音波ビーム」を作ることが肝要だとよくわかりました．この感覚はなかなか不思議な感覚なので，読者諸氏にもぜひ体感していただきたいと思いました

目覚まし時計の音源としては……工夫次第，か？

当初は超指向性に着目し「オレにしか聞こえない目覚まし時計」を狙いましたが，屋内の壁に囲まれた空間では超音波の反射があちこちで起きてしまい，期待していたほどの「超指向性」は得られなかったように思います．

ですが，超音波には「密度が高く硬い物質で遮蔽しやすい」という性質があります．実際，パラメトリック・スピーカを屋内からガラス窓に向けて鳴らした時，屋内では音がよく聞こえましたが，ガラス窓の外側では音が全く聞こえませんでした．

「近隣に聞こえない目覚まし時計」としては，パラメトリック・スピーカを窓ガラスに向けて設置すれば見通しがあるといえる気がします．

リスト2　時刻設定/日付設定のプログラム(1004バイト)

「SAVE 1」でIchigoJam本体に1番のプログラムとして保存する

```
100 VIDEO3:CLS:CLV:P=#707:UART0:OUT5,1:WAIT60:OUT5,1
110 LC3,0:?"-CALENDER-"
120 LC0,2:?"YEAR MONTH DATE"
130 LC0,5:?"DAY:"
140 LC4,7:?"- TIME -"
150 LC4,9:?"HH MM SS"
160 LC4,10:?"  :  :"
170 A=ANA(2)/14+25
180 LC0,3:?"20";A/10;A%10
190 IF IN(1)<>1 GOTO170
200 GSB 490
210 A=ANA(2)/86+1
220 LC7,3:?DEC$(A,2)
230 IF IN(1)<>1 GOTO210
240 GSB 490
250 A=ANA(2)/34+1
260 LC12,3:?DEC$(A,2)
270 IF IN(1)<>1 GOTO250
280 GSB 490
290 A=ANA(2)/147+1
300 LC4,5
310 IF A=1 ?"SUN" ELSEIF A=2 ?"MON" ELSEIF A=3 ?"TUE"ELSEIF A=4 ?"WED"
ELSEIF A=5 ?"THU" ELSEIF A=6 ?"FRI" ELSEIF A=7 ?"SAT"
320 IF IN(1)<>1 GOTO290
330 GSB 490
340 A=ANA(2)/43
350 LC4,10:?A/10;A%10
360 IF IN(1)<>1 GOTO340
370 GSB 490
380 A=ANA(2)/17-1:IF A<0 THEN A=0
390 LC7,10:?A/10;A%10
400 IF IN(1)<>1 GOTO380
410 GSB 490
420 A=ANA(2)/17-1:IF A<0 THEN A=0
430 LC10,10:?A/10;A%10
440 IF IN(1)<>1 GOTO420
450 A=A+1:GSB 490
460 POKE #700,0
470 IF I2CW(#68,#700,1,#701,7) ERR
480 VIDEO1:CLV:OUT5,0:LRUN0
490 OUT5,0:A=A/10*16+A%10:POKE P,A:P=P-1:WAIT60:OUT5,1:RTN
```

リスト3　アラーム設定のプログラム(816バイト)

「SAVE 2」でIchigoJam本体に2番のプログラムとして保存する

```
10 VIDEO3:CLS:P=#703:OUT5,1:WAIT60
20 LOCATE0,0:PRINT"-ALARM SETTING-
30 LOCATE4,3:PRINT"HH : MM"
40 A=ANA(2)/43
50 LOCATE4,4:PRINT A/10;A%10
60 IF IN(1)<>1 GOTO40
70 GOSUB 170
80 A=ANA(2)/17-1:IF A<0 THEN A=0
90 LOCATE9,4:PRINT A/10;A%10
100 IF IN(1)<>1 GOTO80
110 GOSUB 170
120 LOCATE0,7:PRINT"ALARM ENABLE:"
130 A=ANA(2)/100:IF A%2=0 THEN A=0 ELSE A=1
135 LOCATE13,7
140 IF A=0 PRINT"NO " ELSE PRINT"YES"
150 IF IN(1)<>1 GOTO130
160 GOSUB 170
165 GOTO 180
170 OUT5,0:A=A/10*16+A%10:POKE P,A:P=P-1:WAIT30:OUT5,1:RETURN
180 POKE #700,#07
190 IF I2CW(#68,#700,1,#701,3) ERR
200 LOCATE0,9:PRINT"SET CAL/TIME?"
210 A=ANA(2)/100:IF A%2=1 THEN A=0 ELSE A=1
220 LOCATE13,9
230 IF A=0 PRINT"NO " ELSE PRINT"YES"
240 IF IN(1)<>1 GOTO210
250 OUT5,0:WAIT30:IF A=1 GOTO270 ELSE GOTO260
260 VIDEO1:CLV:LRUN0
270 VIDEO1:CLV:LRUN1
```

リスト4　アラーム鳴動のプログラム(586バイト)

「SAVE 3」でIchigoJam本体に3番のプログラムとして保存する

```
100 POKE#700,0:VIDEO5:OUT6,1
110 IF I2CR(#68,#700,1,#701,10) ERR
120 UART1:BPS9600
130 PRINT CHR$(#AA,#18,#01,#00,#C3)
140 PRINT CHR$(#AA,#02,#00,#AC)
150 FORI=0TO9
160  [I]=PEEK(#70A-I)
170  [I]=[I]>>4*10+[I]&15
180 NEXT
190 IF N%2 VIDEO5 ELSE VIDEO6
195 IF N%2 OUT5,1 ELSE OUT5,0
200 LOCATE0,0:PRINT"■■■■■■■■"
210 LOCATE0,1:PRINT"ALARM"
220 LOCATE0,2:PRINT"ACTIVATE"
230 LOCATE1,4:PRINT DEC$([0],2);":";[1]/10;[1]%10
240 LOCATE0,5:PRINT"■■■■■■■";
250 N=N+1
260 WAIT 30
270 IF IN(1)GOTO290
280 GOTO190
290 VIDEO1
300 PRINT CHR$(#AA,#04,#00,#AE):BPS0:UART0
310 OUT6,0:OUT5,0:WAIT30:CLV:LRUN0
```

◆参考・引用文献◆

(1) 野村 英之(解説)；パラメトリックスピーカの原理と応用，日本音響学会誌76巻11号，2020年，日本音響学会.

(2) 中村 健太郎；応用ポテンシャル抜群！超音波エネルギー活用，特集　実験サイエンス！超音波×エレキの世界，トランジスタ技術2022年11月号，CQ出版社.

(3) 和田 有司；超音波スピーカの音圧分布で確かめる　超音波シミュレーションの基礎知識，特集　日本の強み 超音波デバイスの研究，トランジスタ技術2023年2月号，CQ出版社.

(4) Y.YOSHIKAWA；パラメトリック・スピーカー・キットマニュアル第6版，2024年7月，(有)トライステート.

(5) Kazunori Miura；Ultrasonic Directive Speaker: 50+ Piezo Transducers Generate Audible Sound Beam，Elektor Magazine 2011年3月号，ELEKTOR INTERNATIONAL MEDIA BV.，https://www.elektormagazine.com/expose/magazine-article/19559?expire=1760426920&signature=5b06153423fb2ebf3ca387febed100ad59ba99101e8b3bd02e0174af68f09e06

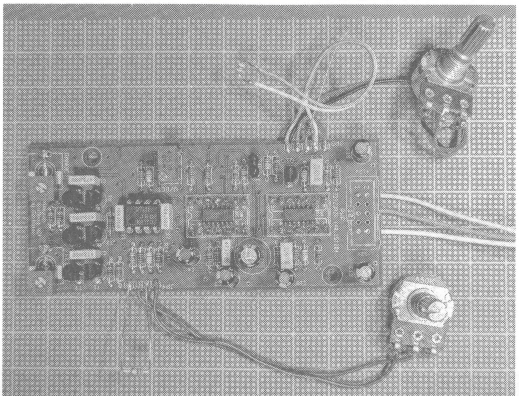
(6) 三浦 一則；パラメトリック・スピーカ実験キット　組立説明書.

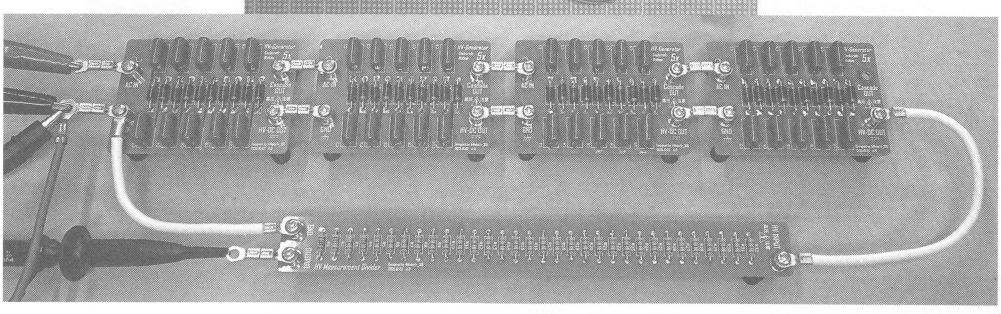
(7) 福野 泰介；IchigoJamで温度表示付きオリジナル時計作りに，245円の4KBメモリ＆RTCモジュールが便利！，福野 泰介の一日一創，2016年6月19日，(株)jig.jp，https://fukuno.jig.jp/1426

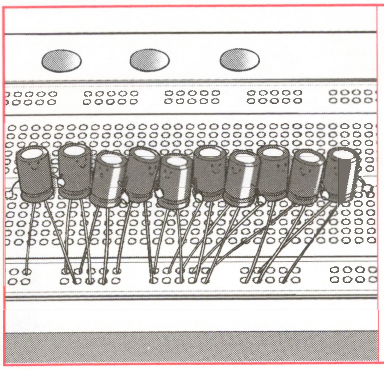
(8) 福野 泰介；メモリが分かればコンピュータが分かる！IchigoJamで4倍角表示する3つの方法とイカサマズンドコチェック，福野泰介の一日一創，2019年12月13日，(株)jig.jp，https://fukuno.jig.jp/2699

第2部

部品を並べる回路技術＆数理







第1章　コンデンサ並列化による性能アップのポイント！

10 μF10個と100 μF1個…パスコンとしての効き目実験

屋並 陽仁　Akihito Yanami

コンデンサは分割して並べると能力が上がる？

3端子レギュレータなどのデータシートで，電源ラインとグラウンドの間に複数のパスコンが接続されている回路例を目にすることがあります．10 μFの電解コンデンサと0.1 μFの積層セラミック・コンデンサなどを並列にしてあるケースが典型的です．

教科書的には，コンデンサを並列で接続したときの全体の容量は各コンデンサの容量の総和になります．上記の例では合計容量が10.1 μFになりますので，0.1 μFを追加することにあまり意味がないように見えます．

しかし実用上は，大きなコンデンサ1つのかわりに小さなコンデンサを複数使うことには無視できないメリットがあります．今回は特にDCラインを安定化させるためのバイパス・コンデンサ(パスコン)での使用を想定して，コンデンサをアレイのように使用する効果について，100 μF 1個と10 μF 10個の比較などで検証しました(**写真1**)．

パスコンを並列化するとどうなるか？

コンデンサがノイズを吸収するメカニズム

一定の電圧と電流(＝直流)について，その比はオームの法則で知られる電気抵抗と呼ばれます．また一定ではない電圧と電流(＝交流)の比はインピーダンスと呼ばれます．コンデンサは時間的に変化する電圧と電流に対して作用しますので，抵抗ではなくインピーダンスZ_cで表現され，式(1)で表されます．

$$|Z_C| = \frac{1}{2\pi fC} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで分母に周波数fが入っていることから，理想的なコンデンサでは周波数が大きくなるにつれインピーダンスが下がり，電流が流れやすくなることがわかります．変動のある電流がコンデンサを流れやすくなるということは，直流に意図せず重畳した交流(＝ノイズ部分)をグラウンドに流すことができ，結果として直流に乗るノイズを抑えることができます．これがパスコンの役割です．

コンデンサの理想と現実…「ESL」「ESR」の存在

式(1)を見ると，計算上の理想コンデンサでは周波数が上がるほどインピーダンスがどこまでも下がるはずですが，現実のコンデンサではそうなりません．

現実のコンデンサには，コンデンサとしての効果(キ

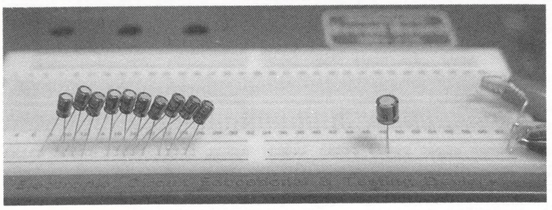


写真1　10 μF10個並列(100 μF)と100 μF1個でパスコンとしての効き目は同じか？…を実験で確かめてみる
コンデンサ周囲の配線長等をそろえるために10個計測時と1個計測時でブレッドボードの配線経路は同一とした

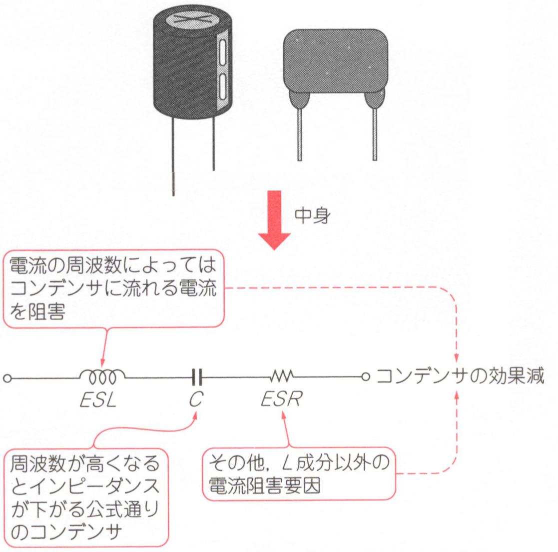


図1　現実のコンデンサの中身にはCだけでなくL成分，R成分も含まれる

ャパシタンス)だけでなく，それと逆の特性を示すコイル的な効果(インダクタンス)が存在します．現実のコンデンサの等価回路を**図1**に，そのインピーダンスを式(2)に示します．

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} \quad \cdots\cdots (2)$$

周波数が高まるにつれインダクタンスが次第に大きくなってくるため，全体のインピーダンスが大きくなり，コンデンサに電流が流れにくくなります．そのためコンデンサが交流を吸い込む能力を最も発揮するのは，キャパシタンスの効果が出てからインダクタンスの影響が大きくなるまでの間の周波数ということになります．

また，最も理想的にコンデンサが機能している状態でも，インピーダンスは完全にゼロになりませんので，その分に相当する抵抗成分(レジスタンス)が残ります．

現実のコンデンサ内に意図せず存在するコイル成分を等価直列インダクタンス(*ESL*)，同じく抵抗成分を等価直列抵抗(*ESR*)と呼びます．これらの値の小ささは，コンデンサの性能指標の1つとなります．

コンデンサの周波数特性例を**図2**に示します．容量が異なると最もインピーダンスが低い周波数が変わります．容量違いで同種のコンデンサであれば，横軸方向に並行移動したようなグラフ概形になります．

並列化すると特性が良くなる可能性アリ

コンデンサの*ESL*は一般に，リード線や電極が長さをもつことによって発生する場合が多く，コンデンサ自体の寸法が大きくなればなるほど*ESL*も大きくなる傾向があります．そのため，寸法的に小さなコンデンサを使用すると*ESL*が改善する場合があります．

また，抵抗器を並列に接続すると合成抵抗が小さくなるのと同様，コンデンサを並列に接続すると*ESR*の影響も小さくすることができます．

これらのことから，大きなコンデンサを単一で使用するよりも小さなコンデンサを複数並列に接続するほうが良い結果が得られる場合があります．

実験1：100 μF1個と10 μF10個並列(100 μF)のパスコンとしての効き目確認

電解コンデンサを例に，単一の大容量コンデンサと複数の小容量コンデンサからなるアレイを比較します．

今回は品種をMH7シリーズ(ルビコン)でそろえ，100 μFのコンデンサ1個と10 μFのコンデンサ10個の並列を比較しました．DC2 Vのオフセットをかけた4 $V_{p\text{-}p}$の正弦波を印加し，コンデンサ両端の電圧を計測しました．オフセットをかけたのは極性指定がある電解コンデンサに負電圧がかからないようにする

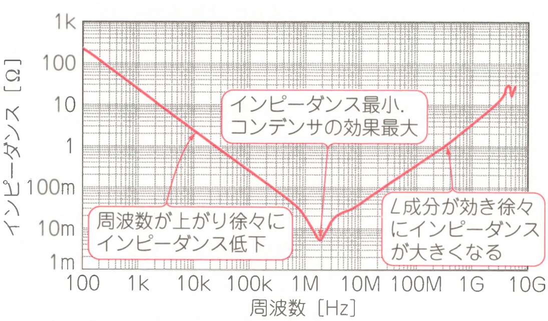


図2　代表的なコンデンサの周波数特性
容量によって最もコンデンサが性能を発揮する周波数が異なる．スイート・スポットは意外に狭い

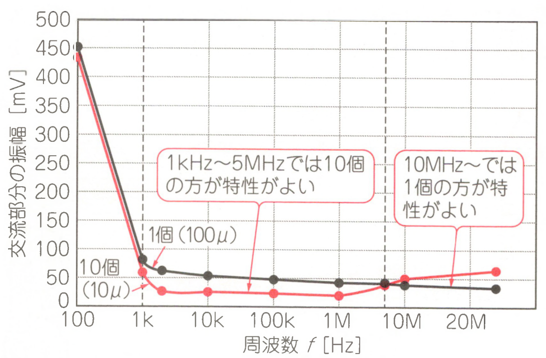


図4　実験1の結果…よしあしは周波数で異なる

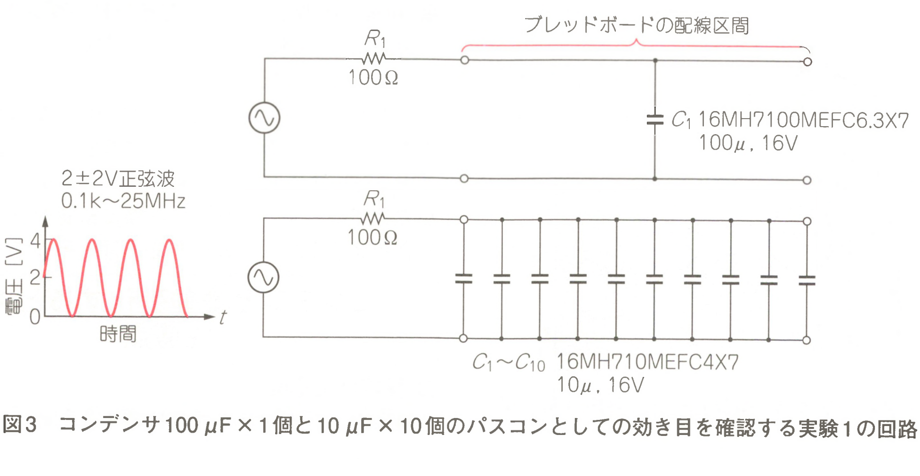


図3　コンデンサ100 μF×1個と10 μF×10個のパスコンとしての効き目を確認する実験1の回路

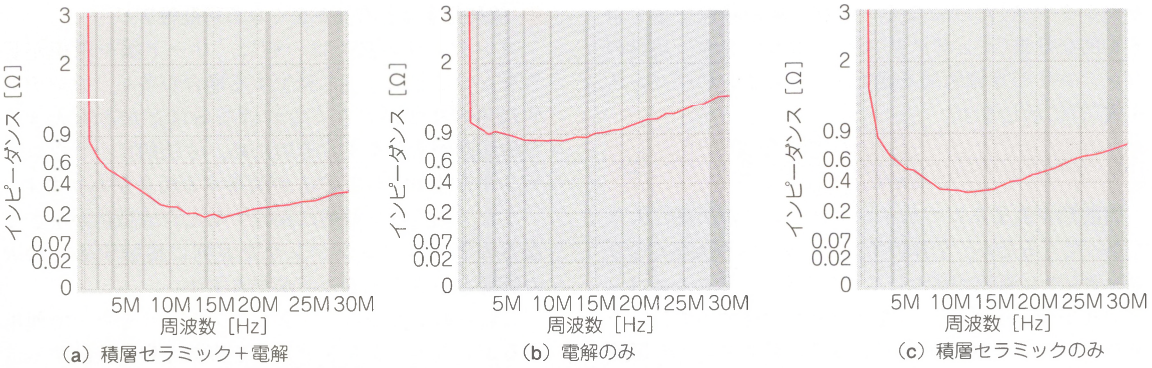


図5　積層セラミック＋電解の周波数特性を見ると単体よりも低域＆最小インピーダンスを低くできている

ためです．回路を**図3**に，計測のようすを**写真1**に，計測結果を**図4**に示します．

● ～5 MHzでは10パラの，10 MHz～では単体の特性がよさそう

1 kHz～5 MHzの範囲ではコンデンサ単体よりもコンデンサ・アレイの両端電圧が低く，インピーダンスを小さく維持できています．DCラインのパスコンとして使用する場合，この周波数においてはコンデンサ・アレイのほうがより良いノイズ除去が期待できます．

逆に10 MHz以上ではアレイのインピーダンスが徐々に大きくなり，コンデンサ単体のインピーダンスが低い状態となっています．これはコンデンサの足を含めたL成分が影響し，ESLが増しているためと考えられます．

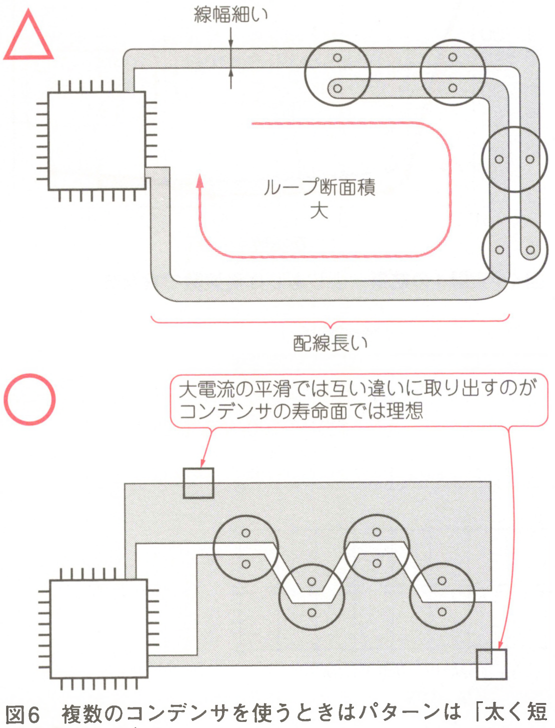


図6　複数のコンデンサを使うときはパターンは「太く短く密集させる」

実験2：値の違うコンデンサ並列時のパスコンとしての効き目確認

● よくある組み合わせ…μFクラス電解コンデンサと0.1 μFセラミック・コンデンサの並列

アレイと言うには小規模ですが，古くから推奨されてきた大きな電解コンデンサと小さな積層セラミック・コンデンサの組み合わせがどの程度特性に寄与しているかを確認してみます．今回は0.1 μFの積層セラミック・コンデンサ，2.2 μFの無極性電解コンデンサ(ニチコンMUSE)，それら2つを並列にしたアレイを計測しました．

また今回は比較的高い周波数帯まで評価したいため，実験1で使用したファンクション・ジェネレータに代えてLiteVNAというネットワーク・アナライザを使用し，周波数ごとのインピーダンスを直読できるインピーダンス・アナライザ機能を用いて行いました．周波数が高くなるためブレッドボードは使用せず，SMAコネクタにコンデンサを直接接続して計測を行いました．

● 電解×積層セラミックでインピーダンスが改善

計測結果を**図5**に示します．積層セラミック・コンデンサだけでは低域のインピーダンスが高く，電解コンデンサだけでは最小値が1 Ω程度と底が浅い一方，この2つを組み合わせることで低域からインピーダンスを下げ，また最小インピーダンスも小さくすることができています．電解を使う際に積層セラミックを組み合わせる意義は十分にあると言えそうです．

コンデンサを並列化するときの注意点

● 配線は太く短く

複数のコンデンサを並列接続するためには配線を伸

コラム　コンデンサを直列に接続はアリ？ナシ？

● コンデンサ直列接続は耐圧を稼げる

コンデンサを複数並列にすると容量が足し算になる一方，直列に接続すると耐圧を稼ぐことができます．たとえば同じ容量・耐圧のコンデンサを2直列にすると，容量は変わらず耐圧が2倍のコンデンサとみなして使用できます．しかし実用上は，この計算通りに電圧を印加してよいかは注意深く検討する必要があります．

現実のコンデンサには個体差があります．各コンデンサにかかる電圧は容量の比に反比例しますので，異なる容量のコンデンサを直列に接続すると各コンデンサに印加される電圧は不均一になります．

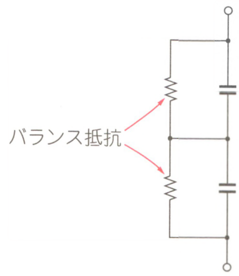
そして公称値と実容量の違いという意味での誤差のほかにも，同一個体でも温度や経年によって容量に変化が生じます．さらに積層セラミック・コンデンサでは印加されているDC電圧によって容量が減少しますので，極端な容量差が生じた場合，容量が小さいコンデンサにより高い電圧がかかり，容量が減少し，その減少したぶん追加で電圧がかかるという状態になり得ます．

耐圧の確保を目的としてコンデンサを直列に接続する場合は，これらの誤差を見込んで，十二分に余裕をもった電圧を印加する必要があります．

● 実装時はバランス抵抗と組み合わせるのが一般的

また，必要な容量・耐圧・寸法の関係上，複数のコンデンサを直列に接続する必要がある場合は，**図A**のように各コンデンサと並列にバランス抵抗を接続することで，充電後の最終的な電圧を抵抗分圧で均衡させるという手段があります．インバータなど高いDC電圧を扱う際には，電源オフ後の自然放電用としてのブリーダ抵抗を兼ねてこのような手法が一般的です．

〈屋並 陽仁〉



図A　コンデンサ直列接続にはバランス抵抗を入れる
抵抗値は印加電圧／漏れ電流の2倍程度に設定

ばす必要がありますが，離れたコンデンサ同士の接続や，コンデンサを挿入したい接続点まで細く長い配線を引き回してしまうと，配線自体がもつインダクタンスの影響が大きくなり，結果としてコンデンサ・アレイ全体の特性を悪くするという本末転倒な事態にもなり得ます．コンデンサ同士は密集させ，極力太く短いパターンや配線で接続し，電流のループ面積も小さく設定することが望ましいと言えます．推奨される配置や配線の引き回し方を**図6**に示します．

● 反共振に注意！

実験2の結果通り，容量が異なるコンデンサの組み合わせは有用ですが，組み合わせる容量の選定や実装には注意が必要です．

容量が大きく異なるコンデンサを組み合わせると，1つのコンデンサのL成分(V字型グラフの右側)と別のコンデンサのC成分(左側)が特定の周波数でLC共振を起こし，その周波数でのみインピーダンスが非常に大きくなる場合があります．この状態を反共振と呼びます．反共振状態のイメージを**図7**に示します．

コンデンサの周波数特性をデータシートから入手して事前にシミュレーションを行い，あたりをつけておくのが理想です．ただし高周波に対応しようとする場合は配線やプリント基板のパターンに含まれるL成分も大きく影響しますので，複雑なシミュレーションを行う環境がそろっていない限り，最終的には試作後の実機で確認することになります．

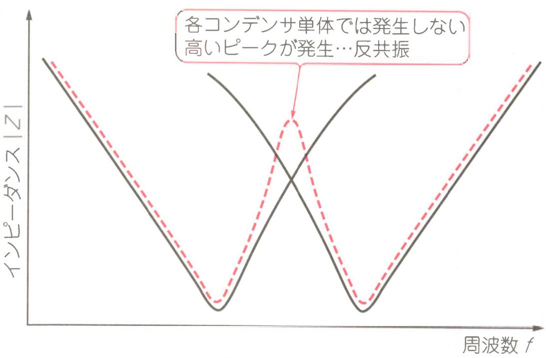
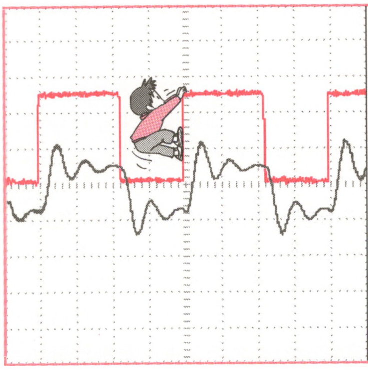


図7　値の違うコンデンサを組み合わせるときは反共振に注意！

数十MHz以上については，ブレッドボードでの試作と基板実装時の挙動は別物になると考えなくてはいけません．



第2章 ディスクリート部品の個性は単音シンセサイザ向き！

読者プレゼント p.36

トランジスタ・ラダー型電子楽器用電圧制御フィルタ

安田 仁 Jim Yasuda

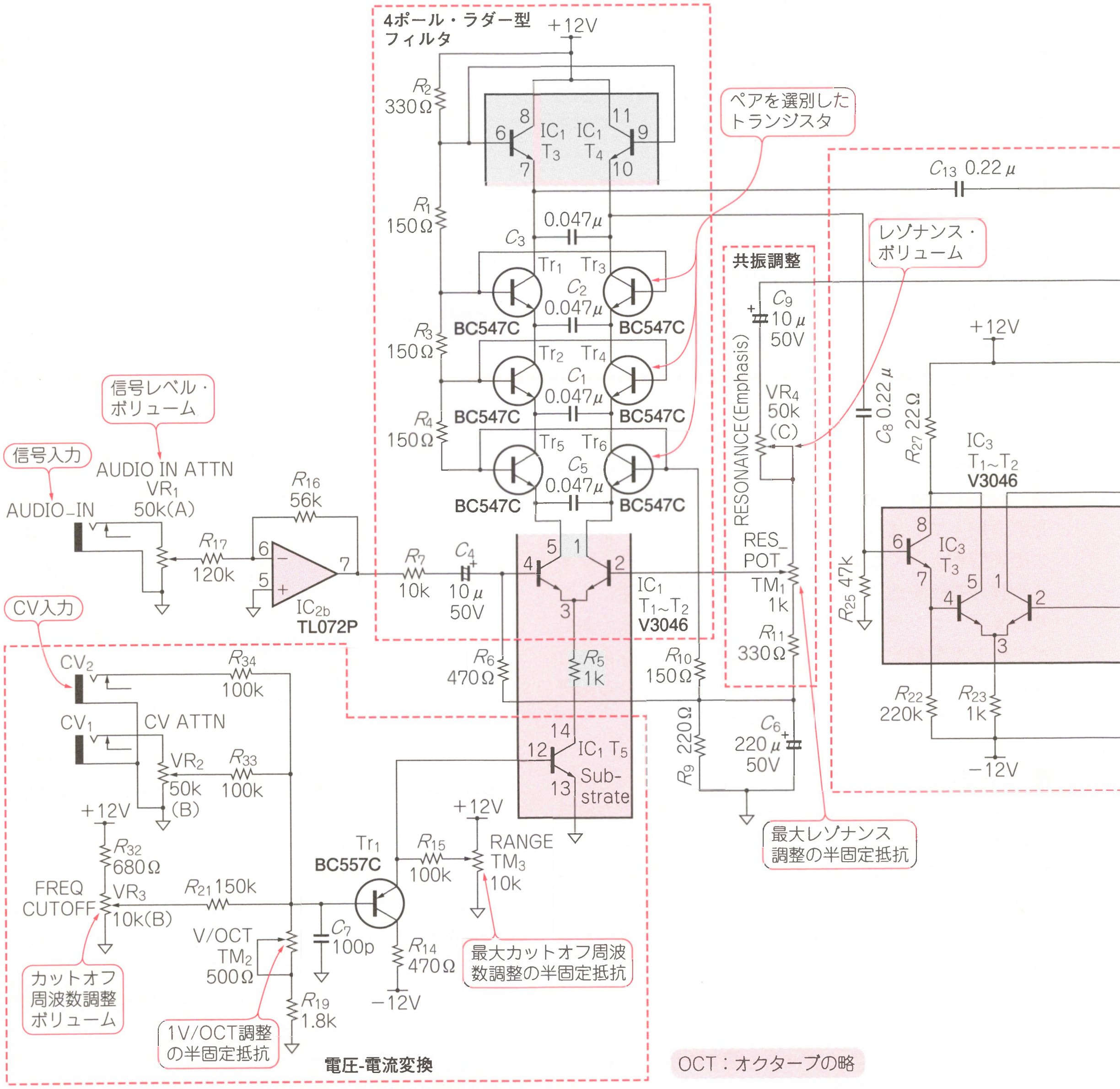


図1 製作した電子楽器用のラダー型電圧制御フィルタVCF回路
MiniMoog(Moog)を参考にした

今回は，トランジスタをはしご状にしたラダー型の電子楽器用の電圧制御フィルタ（以下VCF）を製作します．本誌の2024年4月号[1]で紹介したVCFの別バージョンに相当します．

電子楽器に使われるラダー型電圧制御フィルタVCFとは何ぞや

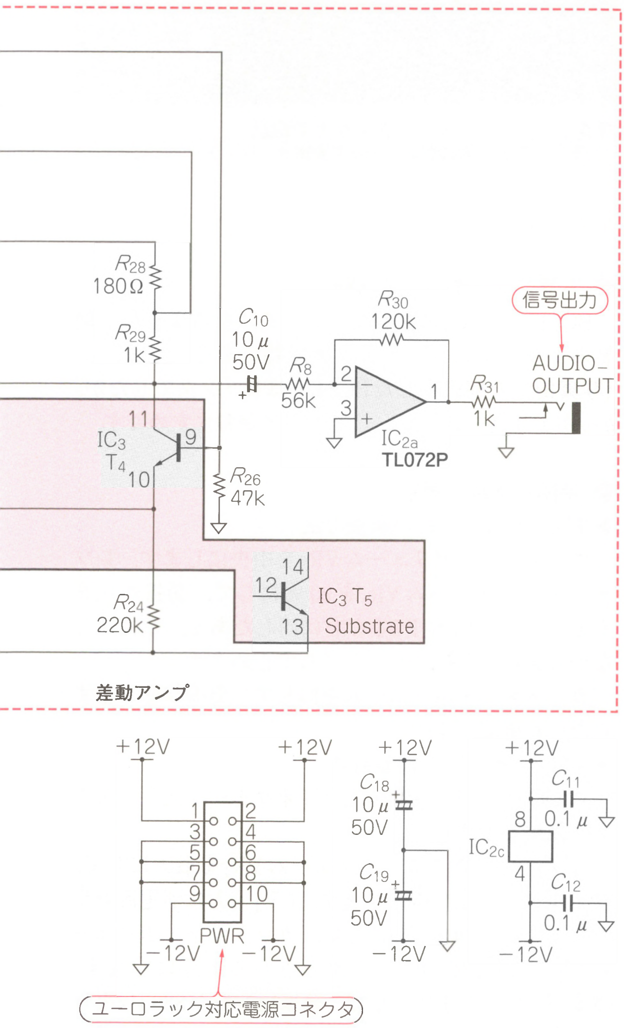
● トランジスタを抵抗として使う多段構成フィルタ

ラダー型VCFを採用したシンセサイザとしては，MiniMoog（Moog社）が有名です．**図1**は，MiniMoogを基にして筆者が製作した回路です[2]．ラダー4段＋差動入力段のNPNトランジスタが直列になっています．ラダー部分のトランジスタ（ベース-エミッタ間ダイオード）を抵抗素子として使います．わずかなベース電流値によって広範囲な抵抗値が変化します．コンデンサと組み合わせることで，電流制御によるフィルタが構成できます．

ペアとなるトランジスタ（IC_1T_3とIC_1T_4，T_1とT_3，T_2とT_4，T_5とT_6）は，安定した動作電流を供給するためにカレント・ミラーとなっています．

フィルタの制御電流は，Tr_1とIC_1T_5のトランジスタで電圧-電流変換を行い，電圧で制御するようになっています．Tr_1のベース-エミッタ間電圧V_{BE}とコレクタ電流I_Cが指数関数の関係にあることで，1 V/oct（1 Vにつき周波数が倍）で周波数が変化します．発振器のように音程に直結しないので，トランジスタ1個で簡単に済ませているようです．

トランジスタによる回路のため，温度によるドリフトが発生します．温度補償などの対策が必要なところですが，発振器でないためか対策された回路や基板を見かけることはまれです．



● 派生回路が多くある背景

ラダー型VCFはよく知られているため，デバイスを変えてみるなど派生回路が多く存在します．後段の差動型出力アンプはトランジスタで構成されていますが，OPアンプに置き換えた回路やラダー部分のトランジスタをダイオードに置き換えた回路などがあります．

派生回路が多いのは，設計者のロバート・モーグが1969年に特許を取得していたという事情があります．特許を回避するために，1970年代当時のエンジニア達が苦労していたことが伺えます．

また，差動増幅回路なのに，抵抗値などが対称になっていない箇所が見受けられます．電子楽器で独特の音色を出すことが目的なので，試行錯誤した結果なのでしょう．

オーディオ・アンプだと低ひずみやフラットな周波

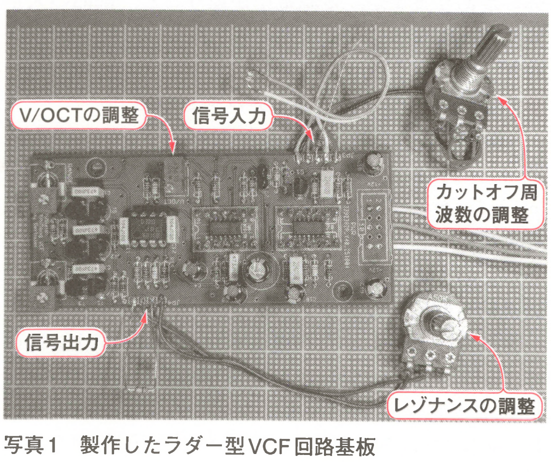


写真1　製作したラダー型VCF回路基板

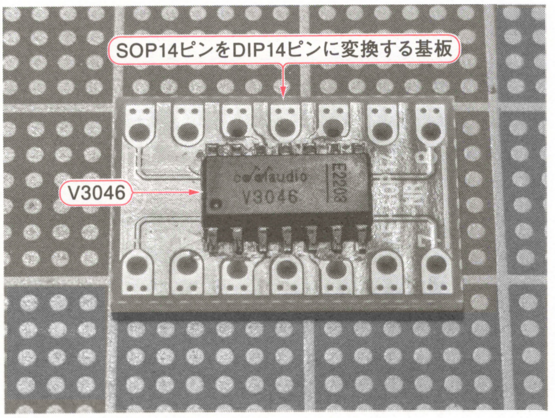


写真2　V3046の外観
秋月電子通商のDIP変換基板を使用した

数特性のように素直な特性が好まれますが，電子楽器は意図的に非直線領域を使ったりして特徴のある音にすることがが多く，同じ音を扱っていても設計思想が異なります．

回路＆製作

実際にラダー型VCF回路を製作してみました．

製作は，YuSynthというウェブ・ページに掲載されているEUROラック仕様のVCFを基にし，基板はGitHubにアップされているデータを使用しました．

製作した基板を**写真1**に示します．この基板はオリジナル回路をさらに安定にするために，差動部分は特性がそろったトランジスタ・アレイV3046(Coolaudio)が使用されています．CA3046(ルネサス エレクトロニクス)のセカンド・ソースであるV3046のほかに，AS3046(ALFA)やLM3046(テキサス・インスツルメンツ)なども使用できます．

国内で販売されている部品を使用したので，再現性は容易でしょう．MiniMoogのオリジナル回路と一部違いがありますが，電源電圧が違うこと，部品の入手性で変更になっているようです．

5個入りトランジスタ・アレイV3046

5個の電気的特性がそろったNPNトランジスタが内蔵されたトランジスタ・アレイです．トランジスタが同一パッケージ内にあるので，温度補償しやすく特性も均一です．T_1，T_2は差動増幅用にエミッタが共通となっています．T_5のエミッタ(Substrate)は，使用電圧の最低電位にするようデータシートに記載があります．

オリジナル回路からの変更点は，未使用のIC_3T_5のエミッタ(12ピン)を－12 Vに接続したところです．

表面実装タイプを入手したので，**写真2**のようにDIP変換基板(AE-SOP14-NR，秋月電子通商)を使用しました．



写真3　トランジスタ・チェッカで選別
トランジスタを入れ替えてh_{FE}を測定

トランジスタのペア選別

BC547L(UTC)は高いh_{FE}でペアになるように，簡易のトランジスタ・チェッカで特性をそろえました(**写真3**)．今回入手したBC547LはBランクでしたが，h_{FE}がより高いBC547L-Cでのペアがおすすめです．

半固定抵抗の調整

▶ TM_1(RES-POT)の調整方法

カットオフ・ボリュームVR_3を中央にします．レゾナンス・ボリュームVR_4を90 %にして，発振が止まるところまでRES_POTを右に回したあと，左に戻しながら発振が開始されるところで止めます．

カットオフ・ボリュームを回して，発振状態が止まらないか確認します．

▶ TM_2(V/OCT)の調整方法

V/OCTは，1 Vを加算して1オクターブ変化するように調整します．

まず，レゾナンス・ボリュームVR_4を最大にして，フィルタを自己発振させます．CV_2入力に別電源を用意します．最初に0 Vにして，カットオフ・ボリュームVR_3を回して440 Hzが出力されるようにします．電源器の電圧を1 Vとして，発振周波数が880 HzとなるようにTM_2でV/OCTを調整します．

2 Vで1760 Hzになっているか確認します．周波数

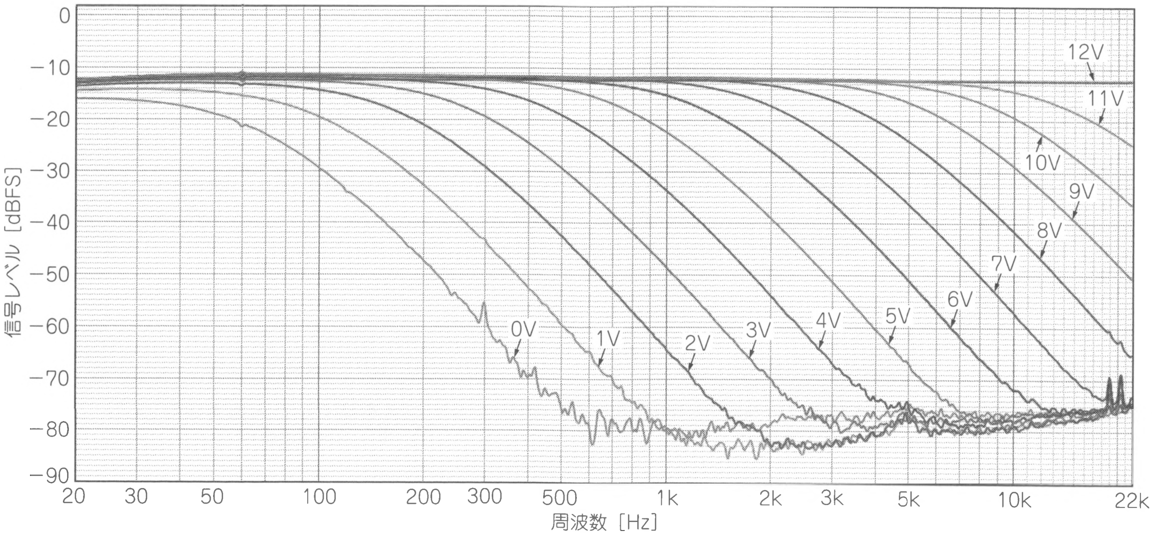


図2　製作したVCFの周波数特性(1 dB/div，20 Hz～22 kHz)

カウンタで調整しますが，楽器用のチューナがあれば視覚的に調整しやすいでしょう．スマートフォンのチューナ・アプリも調整には便利です．

▶ TM_3(RANGE)の調整

カットオフ・ボリュームとレゾナンス・ボリュームを最大にします．発振周波数が17 kHzになるように調整します．15 k～18 kHzの間で好みにあわせて上限を決めます．

フィルタ特性の実測

● 測定系と結果

Room EQ Wizardソフトウェア(コラム)を使い，周波数特性を計測してみました．**図2**に示すように，素直な減衰特性が得られました．60 Hzと180 Hzの変動は，AC 100 V/60 Hzの影響です．高域の減衰が悪化しているのは，フィルタ部のトランジスタ電極間容量によって，通り抜けが発生しているようです．

レゾナンスを上げていくとピークが盛り上がり，自

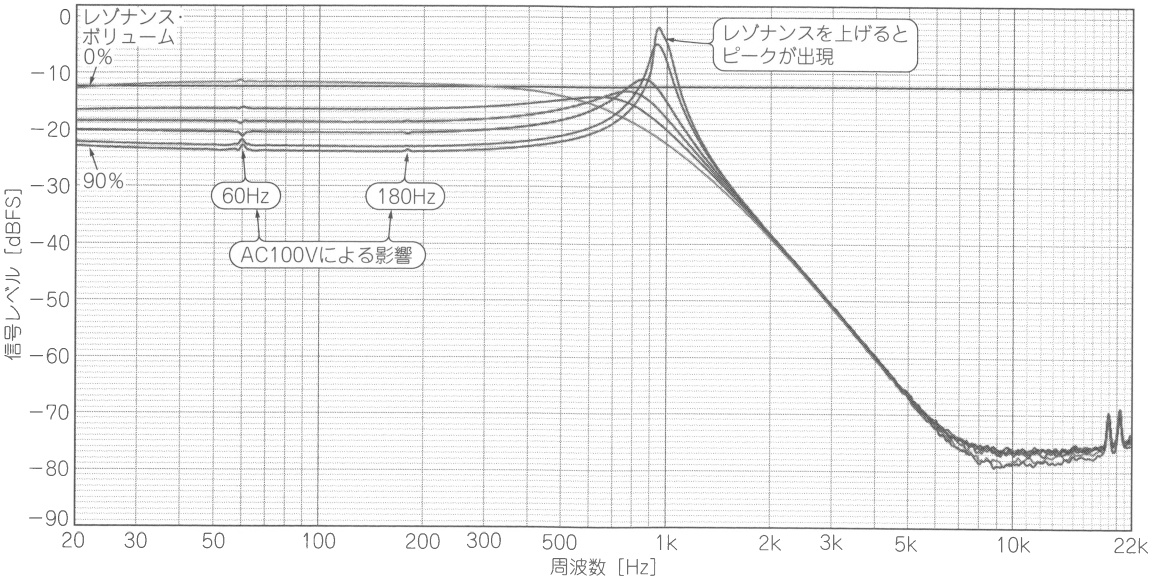


図3　製作したVCFのレゾナンス特性(1 dB/div，20 Hz～22 kHz)

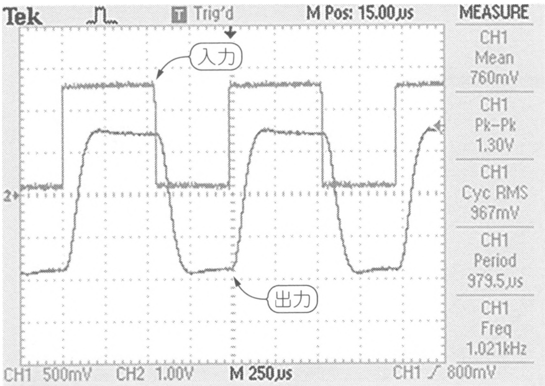


図4　レゾナンス0時の入出力波形(入力：500 mV/div，出力：1 V/div，250 μs/div)

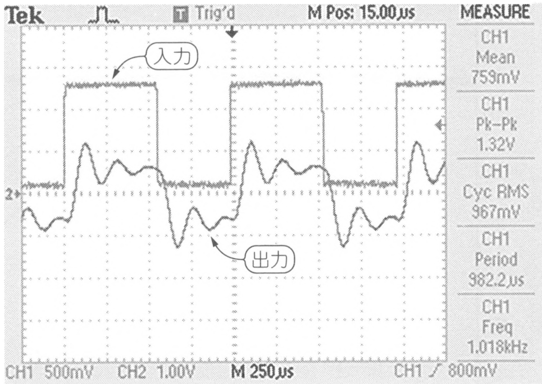


図5　レゾナンスを高くした入出力波形(入力：500 mV/div，出力：1 V/div，250 μs/div)

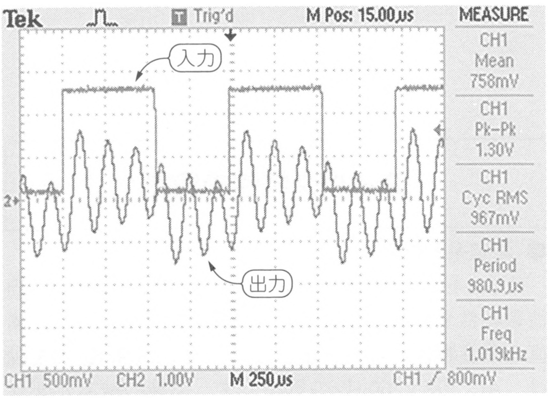


図6　発振寸前までレゾナンスを上げた入出力波形(入力：500 mV/div，出力：1 V/div，250 μs/div)

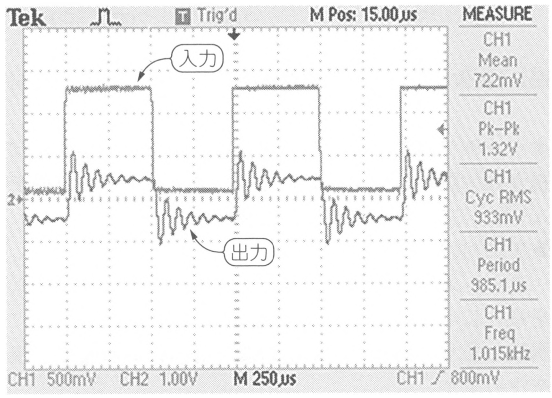


図7　カットオフ周波数を高くしてレゾナンスを上げた入出力波形(入力：500 mV/div，出力：1 V/div，250 μs/div)

己発振状態になります．**図3**が1 kHz時のレゾナンス特性，**図4**が入出力波形です．

レゾナンスを高くした入出力波形を**図5**に，発振寸前までレゾナンスを上げた入出力波形を**図6**に示します．

また，カットオフ周波数を高くし，レゾナンスを上げた入出力波形を**図7**に示します．

● 和音向きOTA型と今回のラダー型のちがいについて

図8は，LM13700を代表とするOTAを使ったフィルタ回路です．フィルタの段数ぶんのOTAとコンデンサが必要です．

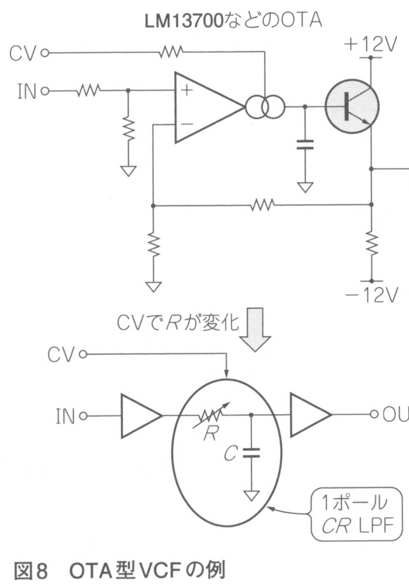


図8　OTA型VCFの例

OTA型VCFは，V3320MやV2044A(Coolaudio)などの専用ICがあり，簡単にVCFが構成できます．専用ICなので安定性や再現性が高く，和音を使うポリフォニック・シンセサイザや量産向きのフィルタです．

ラダー型VCFはディスクリート部品で構成していますので，個々の部品による影響が大きく，単音(モノフォニック)シンセサイザ向けのフィルタです．この回路を採用した電子楽器は，個性的な音色で現在も人気があります．

コラム　周波数特性を計測するのに便利なソフトウェアRoom EQ Wizard

Room EQ Wizard（REW）は，音響測定が行えるドネーション（任意寄付）ウェアです．Windows/Mac/Linuxで利用でき，https://www.roomeqwizard.com/からダウンロードできます．

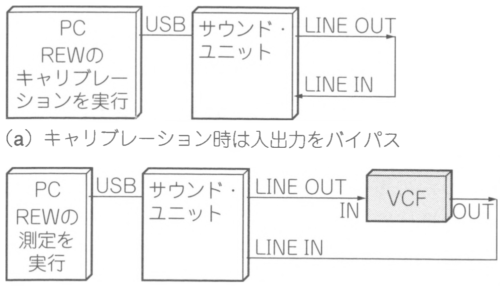
REWは本来，リスニング・ルームやスピーカの特性を測定するソフトウェアです．スピーカから出力されるスイープ音をマイクで拾い，パソコンに取り込んでレベルをグラフ化します．スピーカとマイクの代わりに被測定物（今回はフィルタ回路）を入れると，周波数特性などを簡易計測できます．

パソコンと録音/再生ができるサウンド・ユニット（パソコン内蔵のサウンド機能で可能）があれば，フィルタの測定ができます．

今回は，PCM2906CDB（テキサス・インスツルメンツ）を使ったUSBサウンド・ユニットを使って測定しました．PCM2906CDBは，48 kHz，16ビット・サンプリング可能なUSBオーディオ・デバイスです．サウンド・ユニットによって周波数特性が違うので，図A（a）のように，Lineの入出力を接続してキャリブレーションを行います．

測定は，図A（b）のようにオーディオ・デバイスと被測定物の入出力を接続して，ソフトウェアの[メジャー] ボタンをクリックすると周波数特性が表示されます．測定条件を変えたグラフを同時に表示できるので，比較検討が容易にできます．

〈安田 仁〉



（a）キャリブレーション時は入出力をバイパス

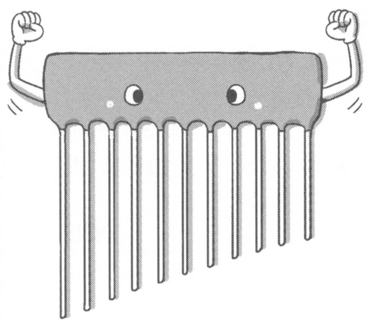
（b）フィルタ測定時

図A　ウェブから入手できる周波数特性測定ソフトウェアRoom EQ Wizard

どちらの方式にも特徴があり，使い分けながら今も現役の回路として電子楽器に採用されています．

◆参考文献◆

（1）安田 仁；アナログ・シンセサイザ用電圧制御フィルタVCFを試す，トランジスタ技術，2024年4月号，pp.69-73，CQ出版社．
（2）YuSynth MiniMoog VCF
https://www.yusynth.net/Modular/EN/MOOGVCF/index.html
（3）gerb-ster/YUSynth MiniMoog VCF
https://github.com/gerb-ster/MiniMoog-VCF.git
（4）Analog2.0，手作り向けシンセサイザーシステム．
https://gaje.jp/analog20/index.html



第3章 データシートには書いていない…ばらつきのそろいを基準電圧等の高精度回路に生かす

集合抵抗による回路性能アップ術！

加藤 高広 Takahiro Kato

広く使われている集合抵抗

いくつかの電子部品を1つに集めた集合部品のなかで，集合抵抗器(レジスタ・アレイ)はポピュラでしょう．**写真1**はその例です．マイコン回路などのバスライン・プルアップ抵抗として使われることが多い部品です．個別の抵抗器を並べるよりも装着が効率的というメリットがあります．

集合抵抗の構成には大きく分けて3種類あります．1つはアレイ型［**図1(a)**］です．全部の抵抗器が完全に独立しているタイプです．もう1つはネットワーク型［**図1(b)**］です．すべての抵抗器の一端が共通端子に接続されたタイプです．バスラインのプルアップなどの用途でもっとも多く使われているものです．

ほかにはR-$2R$ネットワーク型［**図1(c)**］のようにD-Aコンバータ用として抵抗器がR-$2R$形式に内部配線されたタイプがあります．これは用途が決まっているので，ここでは扱いません．以下では，アレイ型とネットワーク型を工夫して回路の高性能化をはかる例を紹介します．

データシートには書いていない集合抵抗の現実の特徴

集合抵抗をプルアップ抵抗器として使うなら一般的な抵抗器と同じです．省スペースになり装着も効率的

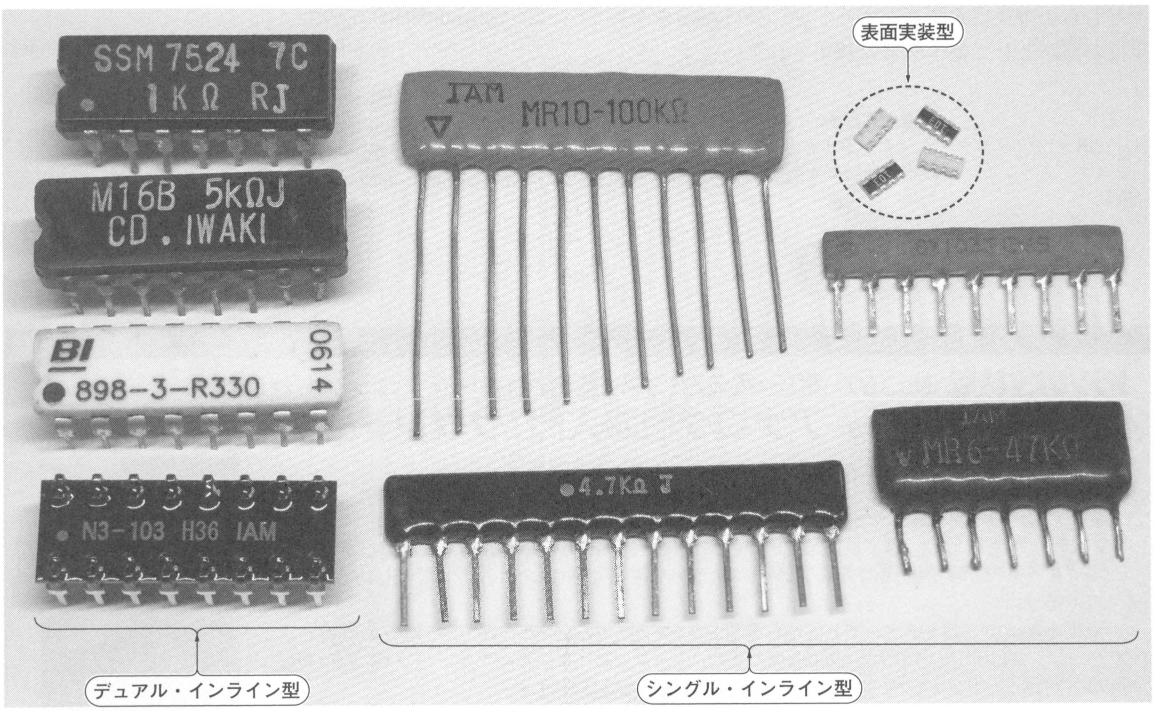


写真1　集合抵抗器(レジスタ・アレイ)は広く使われていてパッケージもいろいろある
複数の抵抗器をまとめて1つのパッケージに封止したもの．大きく分けてデュアル・インライン型とシングル・インライン型があり，現在は表面実装型が主流になってきた

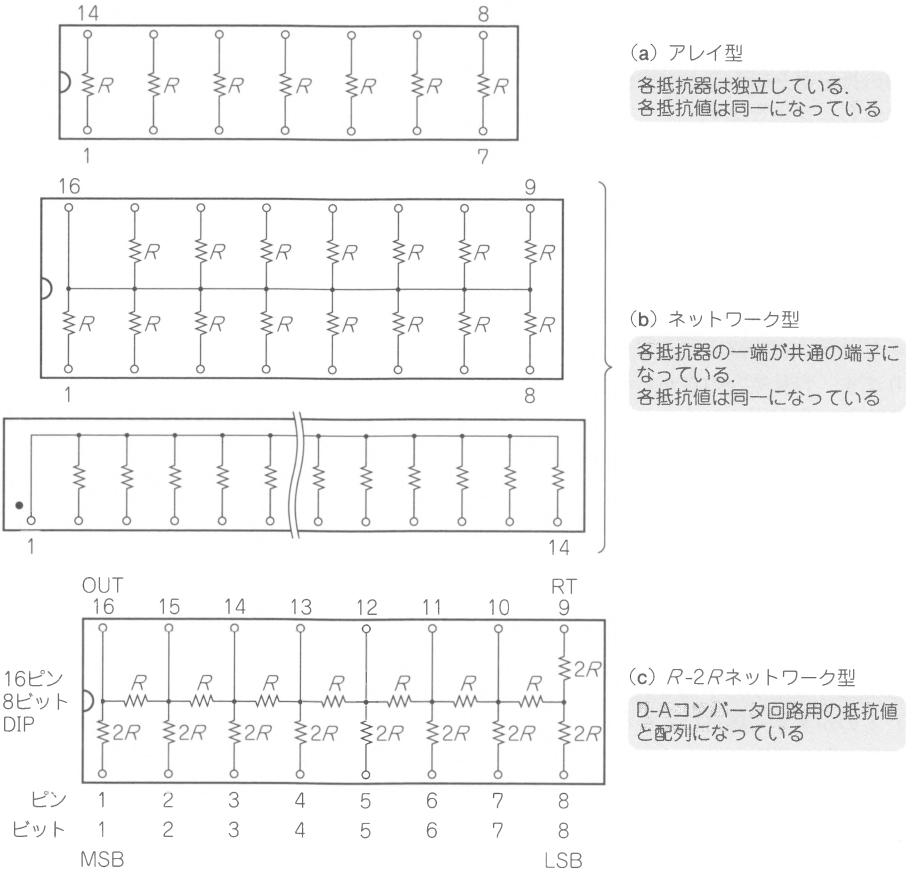


図1　集合抵抗には回路構成のタイプがいくつかある

という特徴はありますが，回路として性能がアップする訳ではありません．

ここではその特徴をアナログ回路に生かした使い方を紹介します．アナログ回路に使うとき，大きく2つの特徴があります．

● 特徴1：抵抗値相互の誤差が少なくよくそろっている

同一パッケージ内の抵抗器は抵抗値がよくそろっていることがあります．**表1**は実測した抵抗値の例です．**表1**の①②は，±2％精度のものですが，抵抗器相互の誤差は平均値に対して±0.1％もありません．**表1**の③は手持ちにあった規格が不明で，±5％精度と思われるものですが，±0.3％に入っています．したがって，OPアンプ回路の負帰還回路の抵抗器として使うと，増幅度の精度が良いアンプが無調整で作れます．

同一パッケージ内の抵抗器を直列や並列で負帰還回路の抵抗器として使えば，精度が良い多様な倍率の増幅器が無調整で可能なわけです．飛び飛びの値にはなりますが，組み合わせ次第で，さまざまな増幅倍率の回路が考えられます．

● 特徴2：温度係数がそろっている

もう1つの特徴はそれぞれの抵抗器の温度係数がよくそろっていることです．個別抵抗器の組み合わせで増幅回路を作ると温度特性が悪くなるのが普通です．

表1　集合抵抗の相対精度

レジスタ・アレイを実測してみた．①②は写真1の左列最下段のもの．③は写真1の最上段のもの．相対的な精度はとても良いことがわかる

	①BDN-3-102GLF	②BDN-3-103GLF	③SSM1kΩ
8素子の測定値範囲[Ω]	995.18 ～ 996.83	9982.7 ～ 9988.5	987.83 ～ 991.70
実測平均[Ω]	995.996	9983.46	989.620
平均値からの相対精度[％]	±0.084	±0.067	±0.210
ばらつき（標準偏差）	0.529	3.827	1.418

（①②）仕様
定格電力＝0.25W
抵抗値精度＝G(2％)
抵抗値温度係数＝±100ppm/℃
温度係数の相対値＝規格なし
最大印加電圧＝100V
外観形状＝DIP16ピン型

（③）これは参考値
仕様：不明
外観形状＝DIP14ピン

しかし集合抵抗の抵抗器は相互の温度係数が良く，マッチしているのが普通です．従って同じパッケージ内の抵抗器を組み合わせて作った回路の増幅度は温度に対して安定します．

● 注意点：静電容量結合や電流リークがある

集合抵抗には固有の欠点もあります．各抵抗器が密集していることから，相互の抵抗器には静電容量的な結合（C結合）が存在します．

また，微小ながらも電流リークが考えられます．従ってアナログ回路に使うなら欠点を考慮する必要があります．容量結合の点から集合抵抗の抵抗値はあまり高くない方が好ましく，だいたい1k～100 kΩが扱いやすい範囲です．私は主に1 kΩ，10 kΩと100 kΩを使います．

● 集合抵抗の選び方

私が手に入れた集合抵抗は一般品のため，抵抗器相互の温度特性のマッチングは規定がありませんでした．ただし，実力としてはよくそろっています．製品によっては「マッチングは50 ppm以内」のように規定したものがあり，価格はあまり違いません．

従って仕様書でマッチングが規格化されている製品を選ぶのも良いでしょう．個別抵抗器を同じ本数購入するのとほぼ違わないコストで購入できます．

通販可能なものとして，たとえば4100Rシリーズ（BOURNS社）は単価250円くらいです．

性能アップ①…基準電圧発生回路に使う

集合抵抗を使って回路を高性能化する例として，+10.000 Vの基準電圧発生器を検討してみます．

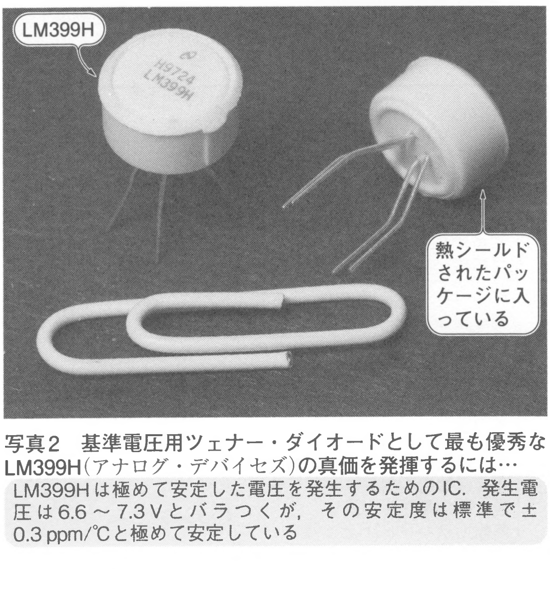


写真2　基準電圧用ツェナー・ダイオードとして最も優秀なLM399H（アナログ・デバイセズ）の真価を発揮するには…
LM399Hは極めて安定した電圧を発生するためのIC．発生電圧は6.6～7.3 Vとバラつくが，その安定度は標準で±0.3 ppm/℃と極めて安定している

● 基準電圧用ツェナー・ダイオードLM399Hとは

LM399H（アナログ・デバイセズ）は容易に入手できる基準電圧用ツェナー・ダイオード（定電圧ダイオード）としては，最も優秀なものです．**写真2**に示します．

特徴として，ツェナー電圧V_zは個体によって6.6～7.3 Vの範囲でばらつきますが，得られる電圧はたいへん安定しています．温度係数は標準で±0.3 ppm/℃，最大でも2 ppm/℃と極めて優秀です．動作から1000時間後の安定性も規格されていて標準で20 ppmです．

従ってLM399Hを基準にして電圧発生器を作れば温度に対して安定した基準電圧が得られるわけです．

● ＋10.000V電圧発生器に使う

ツェナー電圧V_zは，6.6 V～7.3 Vにばらつくので，たとえば+10.000 Vの精密な基準電圧発生器を作ろうとすれば，**図2**のような回路で増幅が必要です．

V_zは6.6～7.3 Vですから，増幅倍率としては1.51～1.37倍が必要です．概略で1.5倍前後の増幅度になるわけです．もちろんこの増幅器の増幅度（ゲイン）は十分安定でなくてはなりません．

● ゲインの安定に集合抵抗が効果的

一般的な±300 ppmの金属皮膜抵抗器で作ったのではLM399Hの性能は十分生かせません．個別の抵抗器で作るなら，必ず温度係数が±50 ppm以内のように保証されているような特別な抵抗器を使う必要があります．もちろんこうした特別な抵抗器はコストや納期が気になります．

この増幅度を決める抵抗器に集合抵抗を使うと有利です．増幅倍率さえ安定していればよいため，回路に使う抵抗器相互の比が安定していれば増幅度も安定しているからです．

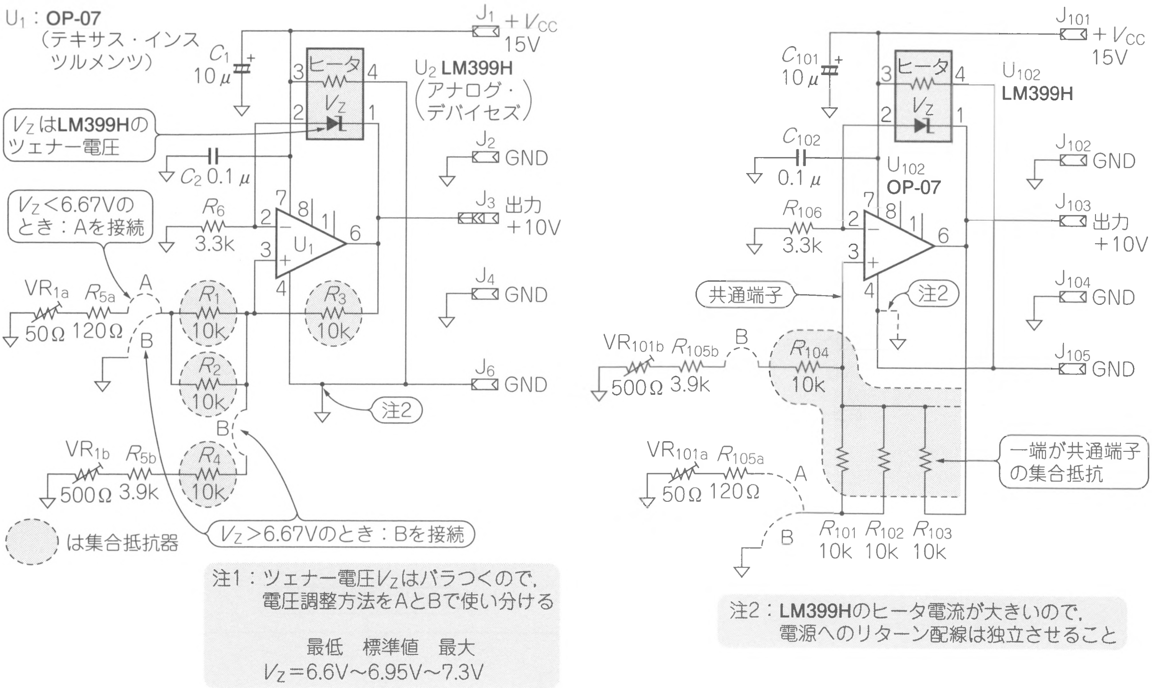
● ツェナー電圧に応じた調整方法を選択する

図2の回路で性能を十分に発揮するための秘訣は，増幅度の調整方法にあります．

まず増幅度は主に集合抵抗内の抵抗器で決定するようにします．**図2**の例でいえば，10 kΩを3つ使って1.5倍の増幅度を得ます．同じ集合抵抗内の抵抗器ですからこれで良い安定度が得られます．

さらに微調整でちょうどよい増幅度に調整しジャスト+10.000 Vが得られるようにします．この微調整の部分が要注意です．この調整部分で温度係数の劣化が起こらぬようにしなくてはなりません．

具体的には，できるだけ狭い調整範囲で済むよう設計します．そのためにはLM399Hの発生電圧V_zを事前に知る必要があります．あらかじめ**図3**に示すような回路で調べておくことです．



（a）各端子が独立した集合抵抗を使う　　（b）一端が共通端子になった集合抵抗を使う

図2　温度安定度が良い精密な＋10.000V電源回路

● 調整回路による性能低下を防ぐ

なるべく狭い調整範囲で済むように回路を切り換えます．**図2**のように，得られたV_zによって調整方法を選択します．

図2でAのケースように調整箇所を主たる抵抗器と直列に入れる場合，調整部分の抵抗値が主抵抗器の1/100なら調整部分が寄与する温度係数も1/100になります．

あるいはBのケースのように主抵抗器と並列に入れて調整する場合，調整部分の抵抗値が100倍なら同じように影響度は1/100になります．

いずれにしてもV_zが6.67 Vに近いものが有利です．事前の測定が設計に役立ちます．あとは製作後に十分な通電エージングを行って，校正された基準と比較調整を行えば優秀な＋10.000 V基準電圧発生器になります．

性能アップ②…絶対値回路に使う

絶対値回路は理想整流器とも言われ，入力された交流信号を全波整流して出力します．**図4**はその例です．

● 絶対値回路で集合抵抗を生かす

図4のようにこれらの回路は同じ値の抵抗器が多用されています．しかも抵抗器の精度が必要です．ただし抵抗値そのものの精度は悪くても抵抗器相互の値がよくマッチングしていれば大丈夫です．

そのため，集合抵抗を使って回路を構成するととて

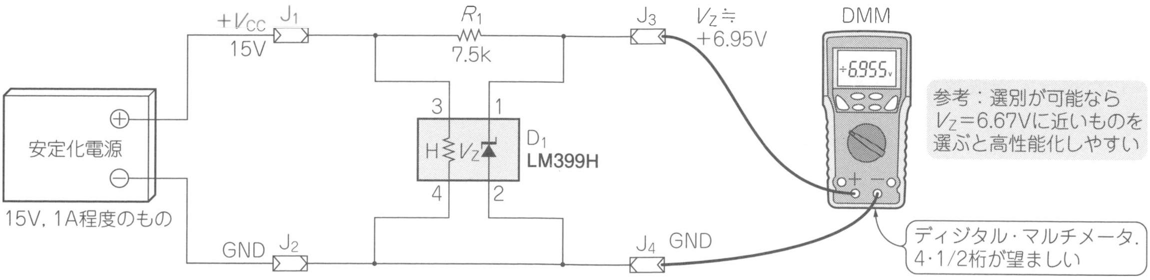
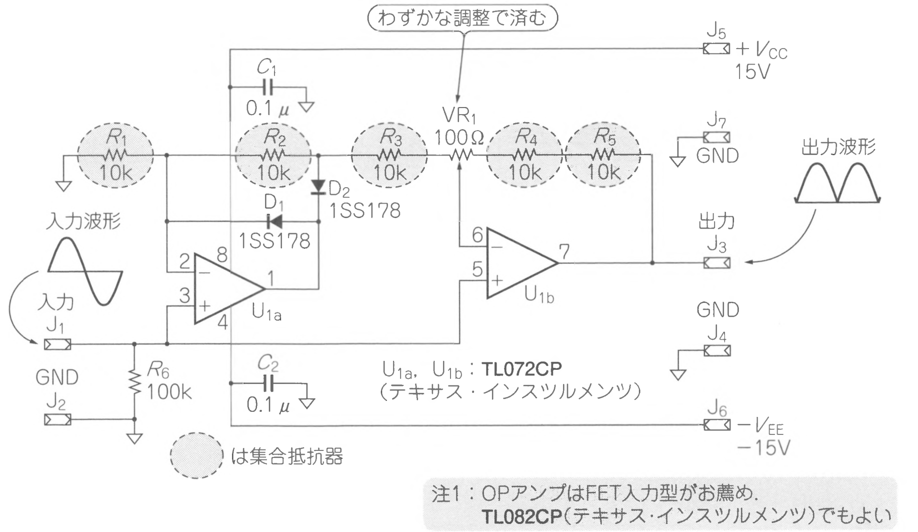
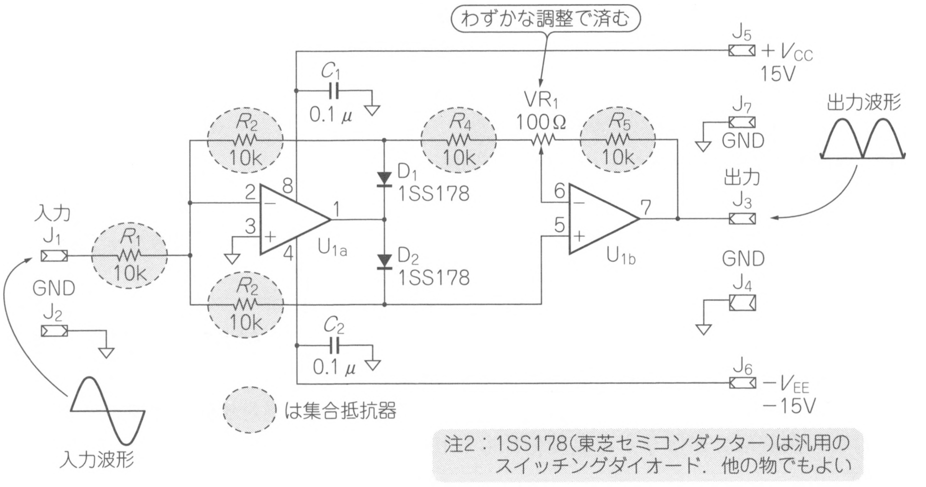


図3　事前にLM399Hのツェナー電圧V_zを測定しておくのが秘訣
事前にV_zを実測しておき設計に使う



（a）入力交流信号を全波整流して出力する例1



（b）入力交流信号を全波整流して出力する例2

図4　集合抵抗を生かした絶対値回路

も有利です．調整もごくわずかな範囲で済みますし温度安定性においても優れます．

● 容量結合を考慮した抵抗値を選ぶ

集合抵抗特有の欠点があります．入力信号の周波数が高くなると抵抗器相互の静電容量的な結合(*C*結合)が効いてきます．

したがって周波数特性を考慮して回路図のように10 kΩあるいは5 kΩを選び，低めの抵抗値で構成することが肝心です．ただし1 kΩ以下ではOPアンプの負荷が重くなります．

100 kΩ以上では容量成分が効いてきて，周波数特性が悪くなります．さらに抵抗器が1か所に集中するため配線の引き回しも少し難しくなります．いくつか注意は必要ですが，絶対値回路は集合抵抗を使うことで良い性能が期待できます．

Appendix

19世紀から現代まで…抵抗アレイの精密測定技術

同じ抵抗値を並べて高精度・高分解能な分圧器を

加藤 大　Dai Katoh

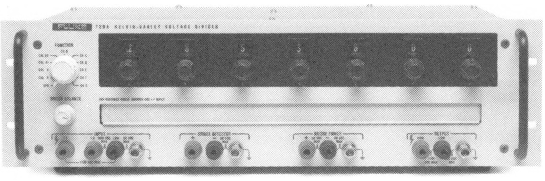


写真1　分圧比を細かく超高精度に設定できる測定器「ケルビン・バーレイ分圧器」720A(フルーク・キャリブレーション)
分解能0.1 ppm，7桁，入力の絶対直線性0.1 ppm

分圧比を高精度・高分解能に設定できるケルビン・バーレイ分圧器

● アレイの良さは昔から知られていた

19世紀に考案された，「同じ抵抗を複数並べる」ことで，現代でも超精密な測定器として活躍しているものにケルビン・バーレイ分圧器があります．

同じ抵抗をたくさん使うことのメリットは，精度・分解能を得るだけでありません．同じ抵抗値ならば，高精度ディジタル・マルチメータなどなくても古典的なホイートストン・ブリッジを使って精密な抵抗器の製作調整が容易にできるのです．

ケルビン・バーレイ分圧器(**写真1**)は，抵抗分圧器の分圧比を，高精度・高分解能な設定ができるようにしたものです．本回路ではボリュームではなくスイッチを使い，ディジタルの多桁で分圧比を設定できます(**図1**)．

● 多桁化の巧妙なアイデア

この回路は，各設定桁に対して11本の基本抵抗が直列につながれています．そして，桁が下がる(**図1**の右側にいく)ごとに基本抵抗値は1/5になります．回路図の左から右に行くにつれて，分圧比を細かくしていきますが，ここのしくみに工夫があります．

それは，上桁からスイッチで下桁に取り出す分圧点は，2本の抵抗(＝2*R*)を挟んだ2カ所であることと，取り出した先の合成抵抗が取り出し元の直列抵抗と同じ(＝2*R*)になっていることです．

分圧点a-b間の合成抵抗は分圧点をどこに設定しても常に*R*で，a-bの分圧比の差は1/10になります．さらに，本回路の入力インピーダンスは常に10*R*になります．

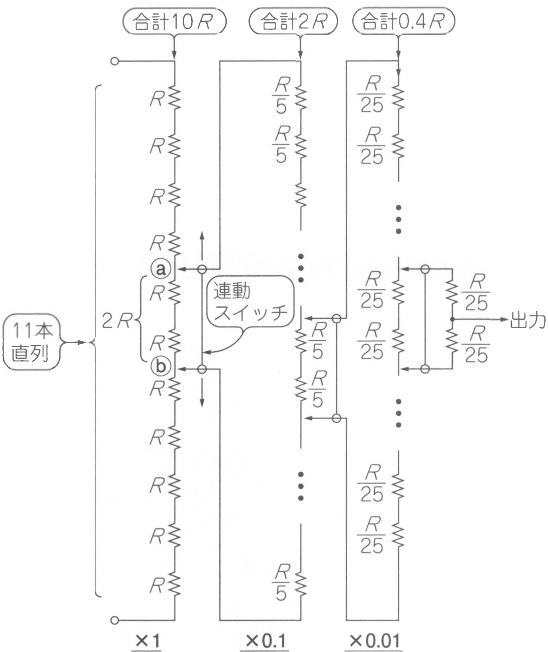


図1　分解能の高い分圧回路が作れる…ケルビン・バーレイ分圧器
本回路は3桁の例

D-Aコンバータでも活躍！…*R*-2*R*ラダー回路

ケルビン・バーレイ分圧器と同じように，同じ抵抗を多数並べ，ディジタルで分圧できるのが*R*-2*R*ラダ

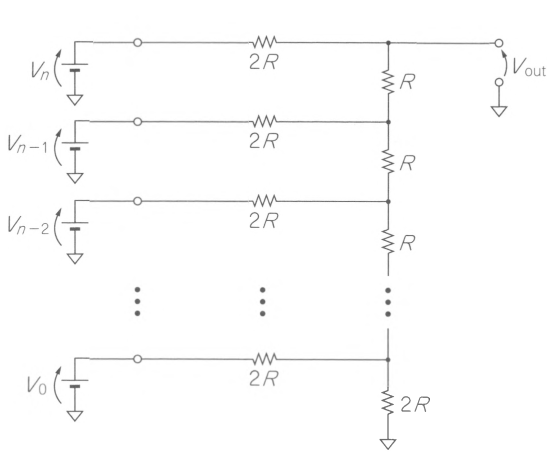
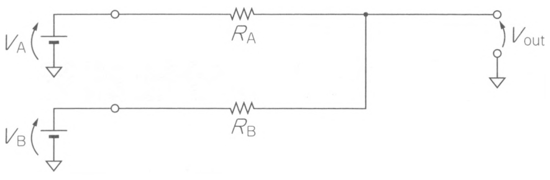
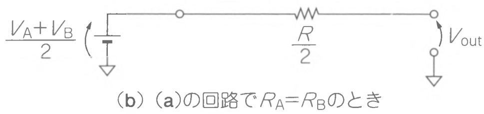


図2　ディジタルで分圧比を設定できる*R*-2*R*ラダー回路

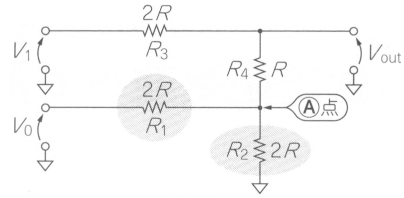


(a) 2つの電圧源V_AとV_Bが抵抗R_AとR_Bで合成されている

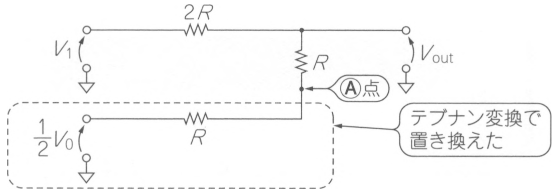


(b) (a)の回路で$R_A=R_B$のとき

図3 R-2Rラダー回路の解析…抵抗による電圧合成回路のふるまいを理解する



(a) 2ビットのR-2Rラダーの回路



(b) テブナンの定理でR_1とR_2をまとめた

図4 Rと2Rの回路をハシゴのように積み重ねると，各電圧源の合成は1/2ずつ小さくなっていく

ー回路です(**図2**)．これは2進数で分圧比を設定します．分圧器の入力電圧を基準電圧にすれば，D-Aコンバータになります．

● 解析の準備…電圧合成便法

抵抗による電圧合成をおさらいします．**図3(a)**は，V_AとV_BがR_A，R_Bで合成されている回路です．この回路はテブナンの定理により変換でき，特に$R_A=R_B=R$のときは次のようになります．

$$V_{out}=(V_A+V_B)/2$$

出力抵抗は$R/2$です［**図3(b)**］．

● ふるまいの解析

図4(a)は，2ビットのR-2Rラダー回路です．

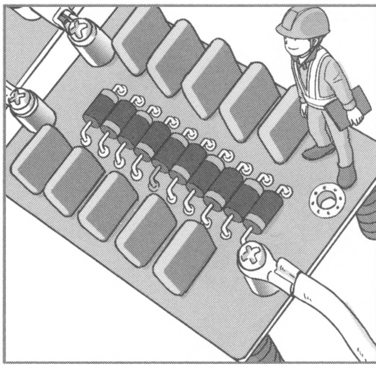
各抵抗の基本抵抗値はRとします．R_1，R_2に着目すると，電圧合成の便法を利用して，点Ⓐを出力とする電圧$V_0/2$，出力抵抗Rの電圧源に置き換えられます．

次に，R_3，R_4と点Ⓐに着目し，電圧合成の便法を利用して，**図4(b)**の等価回路を導けます．この回路が面白いのは，**図4(a)**の上部にRと$2R$の回路をハシゴ(ラダー)のように機械的に積み重ねていくと，その下位の各電圧源の合成の重みは1/2ずつ小さくなっていくことです．例えば，**図4(a)**で4ビットの場合は，

$$V_{out}=\frac{1}{2}\left[V_3+\frac{1}{2}\left\{V_2+\frac{1}{2}\left(V_1+\frac{1}{2}V_0\right)\right\}\right]$$

となります．

つまり，入力電圧V_3～V_0が2進数と同じ倍々の重みを持ちます(binary weighted)．入力電圧V_3～V_0を，0VもしくはV_{in}どちらかに接続すると，この回路はV_{in}の分圧をディジタル的に設定できる回路，すなわちD-Aコンバータになります．実際には0VとV_{in}の切り替えにアナログ・スイッチやバッファ・ゲートを使います．



第4章　つないだ分だけ電圧アップ！高電圧界の定番コッククロフト・ウォルトン回路

ダイオード回路20連で昇圧！1万V出力回路の製作

まこ　Mako

部品を並べる回路は，さまざまですが，その中でも外せないのはコッククロフト・ウォルトン(Cockcroft-Walton circuit，CW)回路があります．ごくシンプルな構成で昇圧できる，高電圧の世界ではド定番で便利な回路の1つです．

写真1に製作したコッククロフト・ウォルトン回路と，高電圧を計測用に分圧する抵抗分圧器を主とした高電圧発生＋計測回路を示します．コッククロフト・ウォルトン回路には交流の入力電圧源が必要なため，これに付随し，専用のインバータとトランスを製作しました．

●免責事項
本記事で紹介する回路は，感電の危険のある高電圧を発生します．この記事を参考にした製作において発生した，いかなる場合においても，著者とCQ出版(株)は，その責任を負わないものとします．
実験をされる場合は高電圧の注意点を理解し，相応の対策をして実験を行ってください．〈編集部〉

つないだ段数倍の電圧を出力する昇圧の定番コッククロフト・ウォルトン回路

コッククロフト・ウォルトン回路(以降，CW回路)は，**図1**に示すようにコンデンサとダイオードのみで構成された非常にシンプルな回路です．

回路はコンデンサ2個，ダイオード2個からなる最

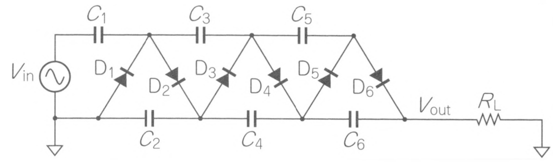


図1　コッククロフト・ウォルトン回路(CW回路)
この例は3段で，最大でV_{in}の$V_{p\text{-}p}$の3倍の直流電圧を出力できる

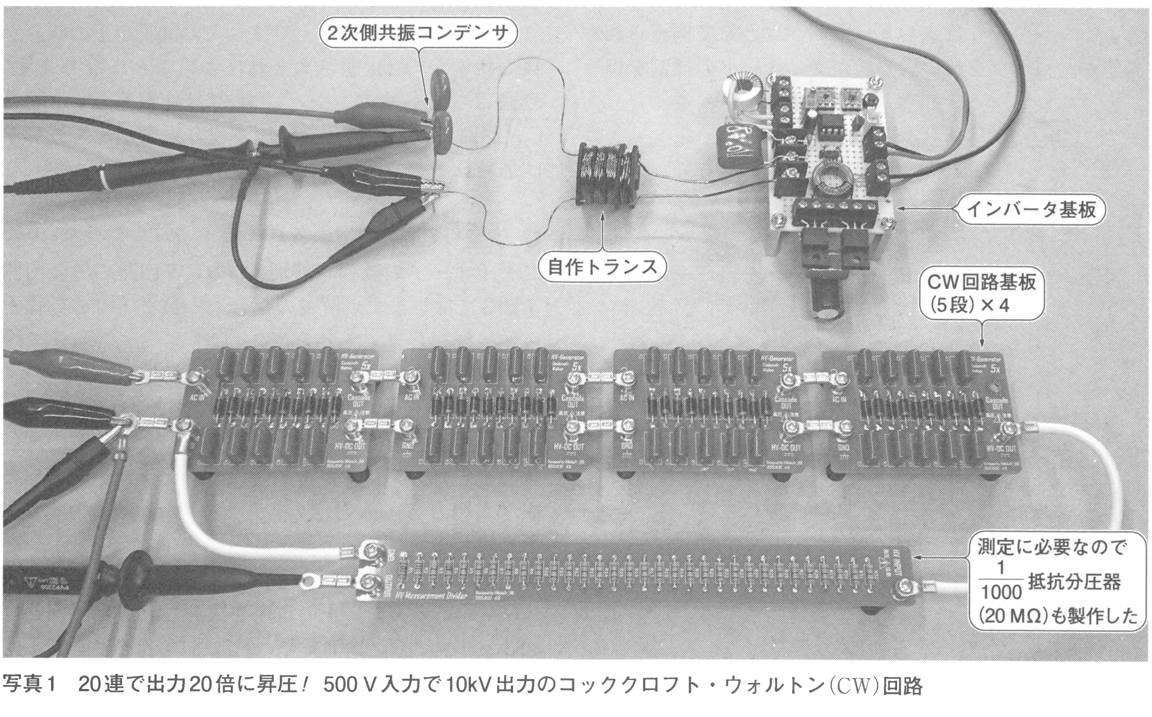


写真1　20連で出力20倍に昇圧！500V入力で10kV出力のコッククロフト・ウォルトン(CW)回路

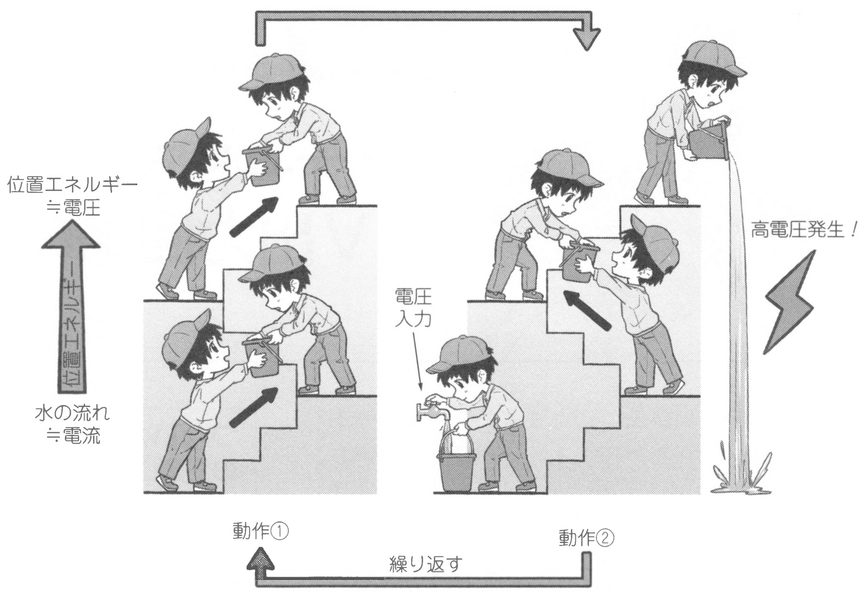


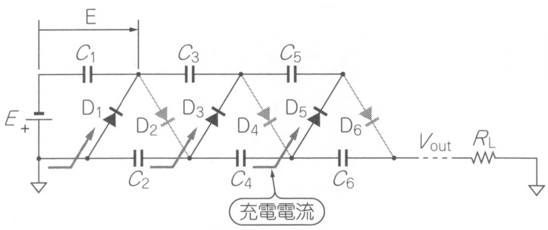
図2　コッククロフト・ウォルトン回路の昇圧動作イメージ

小単位を1段と数え，交流成分をもった電源電圧（正弦波やパルス電圧など）を印加することで，出力にピーク to ピーク電圧（$V_{p\text{-}p}$）の段数倍の直流電圧を出力します．

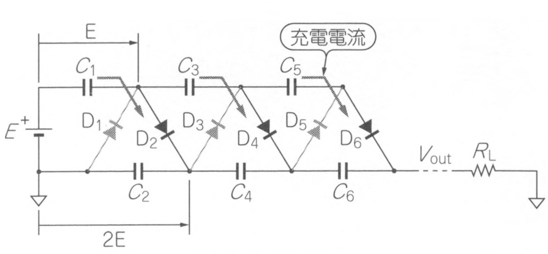
● イメージは電荷のバケツ・リレー

各段のダイオードが入力の交流電圧によって切り替わることで，コンデンサの電荷が次段へ次段へと移動していく動作が肝となり，高電圧を作り出します．例えるならば，CW回路はバケツ・リレーです．

よくコンデンサは水の入ったバケツとして例えられますが，バケツを持つ人の腕がダイオードの役割を担って，高いところにいる次の人にどんどんと水を渡していけば，1人では注げない高いところから水を流せます（**図2**）．これがCW回路の基本動作の考え方です．



（a）負電圧入力時



（b）正電圧入力時

図3　CW回路の動作

コッククロフト・ウォルトン「CW」回路の昇圧メカニズム

● 動作条件…入力はパルス波形とする

ダイオードは電圧の向きによって受動的に状態が変化するスイッチと同義です．理想的にはON/OFFの2状態のどちらかとなります．

動作原理を考えるうえでは，入力電圧が正の状態か負の状態かの2状態さえあればよいことになります．今回は，すべてのコンデンサの容量が等しい3段のCW回路で，入力に正負電圧が繰り返すパルス波形が印加されるものとして，回路動作を考えてみます．

● 安定して動作しているとき（無負荷・定常状態）[(1)(2)]

ダイオードの動作状態別2つのCW回路の等価回路を**図3**に示します．解説の都合上，負電圧での動作から順に解説します．

▶負電圧が入力されたとき

負電圧が入力されると，回路は**図3**（**a**）の状態になります．奇数番のダイオードが閉じ，より電位の高い偶数番のコンデンサが奇数番のコンデンサを充電します．このとき，入力端のコンデンサC_1は入力電圧Eを充電します．

▶正電圧が入力されたとき

CW回路の入力に正の電圧が入力されると，回路は**図3**（**b**）の状態になります．偶数番のダイオードが閉じ，より電位の高い奇数番のコンデンサが偶数番のコ

ンデンサを充電します．

入力端のコンデンサC_1は，C_2を充電しますが，入力電圧Eに対しC_1が直列にEを充電しているため，理想的な定常状態においてGND-C_2＋側端子間は$2E$の電圧に収束します．

▶回路全体としての動作

正電圧が入力されたときと負電圧が入力されたときの2つの回路状態を繰り返すと，入力側で充電された電荷が次段へ次段へと移っていくのがイメージできるでしょうか．

結果として，CW回路は入力電圧が充電された奇数番コンデンサが直列接続となっていることで，入力のGND電位に対して，入力電圧V_{p-p}に回路の段数を掛けた電圧が，直流電圧として出力されます．

● 電源を入れた直後(過渡状態)

CW回路は入力の交流電圧を印加した直後に最大の出力電圧を得られる回路ではありません．回路が動作を開始すると，出力電圧は交流電圧の切り替わりごとに徐々に上がっていきます．

回路の構造上，充電されたコンデンサの電荷放出先は次段のコンデンサであるため，充電元のコンデンサの容量が無限大でない限り，入力電圧をすべて充電先のコンデンサに移動することはできません．

ある未充電のコンデンサを同容量の充電済みのコンデンサが充電した場合，電荷保存則$Q=CV$により，2つのコンデンサの電圧は，充電元コンデンサの電圧の1/2となります．

CW回路では，入力電圧が切り替わるたびに次のコンデンサへと順々に充電するため，各コンデンサに初めて充電される電圧はコンデンサからコンデンサへの充電を重ねるごとに，さらに1/4，1/8と小さくなっていきます．つまり段を重ねるほど，コンデンサへの充電はゆっくりと進みます．

例として，**図4**にLTSpiceでシミュレーションした5段，10段，20段のCW回路で，出力電圧の立ち上がりの違いを示します．この立ち上がりの過渡動作は，充電の原理から各コンデンサの容量がすべて等しい限り，どのような容量のコンデンサであれ一律の比で進行します．無負荷状態では容量による立ち上がり速度の違いはありません．

● 負荷が接続された場合

CW回路では，負荷を接続すると出力電圧が低下します．電圧降下量は，コンデンサの容量，動作周波数，段数に依存します．

回路の構造上，負荷に流す電流は回路の各コンデンサから供給されます．充電されたコンデンサの電荷を抵抗が放出する回路では，時間とともにコンデンサの

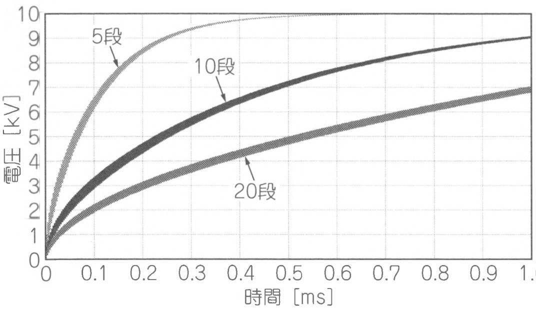


図4　5段，10段，20段のCW回路で出力電圧の立ち上がりの違いをシミュレーション

段数を重ねるごとに電圧上昇に時間を要していく

電圧は低下していきます．CW回路では1周期ごとに充電動作が行われ，低下したコンデンサの充電電圧は定期的に回復しますが，過渡状態の動作で解説したように，1回の充電動作で電圧はすべて回復しません．

結果，一定の電圧降下が定常的に発生します．電圧降下量V_{drop}は，次の近似式で求まります．

$$V_{drop} \fallingdotseq \frac{I_{load}}{fC}\left(\frac{2}{3}n^3+\frac{1}{2}n^2-\frac{1}{6}n\right) \cdots\cdots (1)$$

I_{load}：出力の負荷に流れる電流，f：動作周波数，C：コンデンサの容量

また，負荷にともないリプルも発生しますが，こちらもおおよそ近似式として，

$$V_{ripple} \fallingdotseq \frac{I_{load}}{fC}\left(\frac{1}{2}n^2+\frac{1}{2}n\right) \cdots\cdots (2)$$

により求まります．

CW回路の設計ポイント

CW回路を設計する際の注意点がいくつかあります．回路の設計に必要なパラメータや定数自体は少ない回路ですが，実環境では設計通りになりづらい回路でもあります．

よりよい回路設計につなげられるよう，ポイントをまとめてみました．

● ポイント①…負荷設計をする

CW回路の理想的な動作は，あくまで無負荷での動作であり，負荷を接続すればコンデンサから電荷が流出し，出力電圧が低下するだけでなく，リプルも増大します．平均電圧を考えれば，内部に出力電圧の電圧源と内部抵抗(つまり出力インピーダンス)があるとみなして，外部の負荷に対する設計ができます．

CW回路の出力インピーダンスは，出力電圧降下を示す式(1)を変形させ，

$$R_{out} \fallingdotseq \frac{V_{drop}}{I_{load}} \fallingdotseq \frac{1}{fC}\left(\frac{2}{3}n^3+\frac{1}{2}n^2-\frac{1}{6}n\right) \cdots\cdots (3)$$

により導出できます．

CW回路を設計するときは，負荷に見合わない設計とならないように，駆動周波数や容量を設計し，リプルや電圧降下を十分無視できる設計か，もしくはこれらを見越した負荷側の設計が必要です．

● ポイント②…接合容量を考慮する

実際の回路で厄介なのが，ダイオードの接合容量です．ダイオードの接合容量はダイオードのアノード-カソード間に並列に存在する半導体のpn接合による寄生容量です．

ダイオードに接合容量があると，各奇数番対偶数番コンデンサ間の充放電回路に接合容量が並列に挟まり，輸送中の電荷を失ってしまいます．つまり段を重ねるごとに輸送できる電圧が下がり，無負荷でも出力電圧が低下してしまいます．実環境で負荷の電圧降下を考慮したうえで設計通りの電圧とならない場合，その多くは接合容量による電圧低下が原因です．

ダイオードのデータシートには，接合容量が記載されている場合が多いので，参考としてシミュレーションにしてみるとよいでしょう．しかしデータシート上の記載値は，標準的にDC4 V，1 MHzでの1点の測定値しか記載されていない場合がほとんどです．ダイオードの接合容量は印加されている逆方向電圧に大きく依存(電圧が高いと容量が減少する傾向)するため，実際には印加する電圧によって実環境との乖離が発生します．

そのため設計回路のダイオードに印加される電圧がデータシートの記載条件から離れる場合は，実際に容量を実測するのが確実です．インピーダンス・アナライザや一部の*LCR*メータのDCバイアスを印加する機能があるので，設計回路でダイオードに印加される電圧を測定器で印加可能な場合は，実測値を使ってシミュレーションするのがベストでしょう．

▶設計面での対策

シミュレーションで接合容量起因による電圧降下の惨状に絶望したら，次は設計面での対策を検討します．原理上，接合容量での電圧低下は回路上のコンデンサとの容量比で起こります．容量を大きくすることで軽減が可能です(ただし電流ピークの上昇に注意)．また，CW回路に入力する前に極力電圧を上げられる場合は上げ，多段設計を極力避けることも設計のアプローチの1つです．

● ポイント③…入力波形を考慮する

CW回路では，入力電圧V_{p-p}が同じどんな入力波形でも，出力電圧はほぼ等しくなります．コンデンサやダイオードを流れる電流ないし入力電流においては，入力波形によって電流波形が変化します．

CW回路はコンデンサで構成された回路となるため，大きな*dv*/*dt*のある波形ほど，急峻な電流が流れてしまいます．つまり，矩形波やパルス電圧での入力は大きな突入電流がパルス入力の度に流れ続けることになります．CW回路においては変化のゆるやかな波形，つまり正弦波や三角波，台形波などがダイオードのON時に流れる電流ピークが抑えられ，電源や素子に優しい入力波形となります．

動作周波数や規模によっては放射エミッション設計に関わってくる可能性もあるので，入力波形を選択できる場合や波形を加工できる設計の自由度がある場合は，気を遣った設計ができるとよいでしょう．

回路

● 設計仕様

回路設計にあたり，設計仕様を次のように与えます．

- 段数：最大20段
- 動作周波数：350 kHz程度
- 入力波形：正弦波
- 入力電圧：500 V_{P-P}(振幅250 V)
- 負荷抵抗：20MΩ以下

● CW回路の部品選定と定数設定

▶ダイオードの選定

ダイオードは数百kHzの駆動で問題のない高速動作するもの，かつ500 Vの入力に耐えられるものを採用します．CW回路のダイオード・コンデンサの端子間には入力電圧振幅ではなく，ピークtoピーク電圧(V_{p-p})が印加されます．今回は耐圧1kV，耐電流2 A(パルス電流最大値60 A)，また逆回復時間が75 nsと特に速いUF2010(パンジット)を使用します．

pn接合ダイオードではON状態からOFF状態への遷移に時間を要する(逆回復時間，リカバリ時間)ために，高速でスイッチングをする用途でのダイオード選定には理論上遷移時間の無いショットキー・バリア・ダイオードが好んで使用されます．

今回の用途では，逆方向電圧の最大値がショットキー・バリア・ダイオードで一般的にカバーできる範囲にないことや，逆方向漏れ電流が回路性能に大きく関わる回路のため，pn接合型でも特にファスト・リカバリ・ダイオードを採用するのがベストです．

比較として，50/60 Hzでの整流が主な用途である一般整流用ダイオード1N4007では，データシートに表記のあるメーカのものでは1 μs～2 μs程度と記されており，今回の設計で使用すると1周期の動作の多くを逆回復時間に充ててしまうことが予想されるので，あまり適さないでしょう．

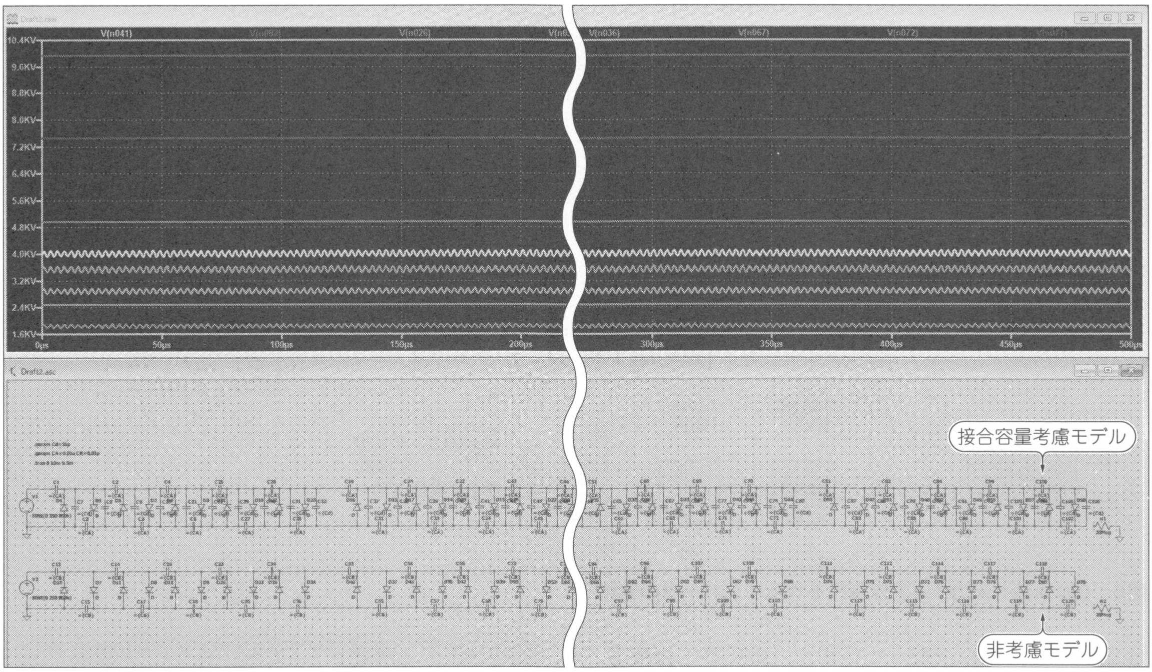


図5　接合容量考慮モデルと非考慮モデルのLTspiceシミュレーション

▶コンデンサの選定

高周波かつラッシュ電流の多い回路のため，誘電正接tan δの低いフィルム・コンデンサを採用することとし，メタライズド・ポリプロピレン・フィルム・コンデンサのMPSシリーズ(ルビコン)から，容量は0.01 μF，500 $V_{P\text{-}P}$での入力が可能な640 V耐圧の630MPS103Jとしました．

● 出力インピーダンスの見積もり

回路の段数n = 20段として，式(3)より出力インピーダンスを見積もります．

$$R_{out} \approx \frac{1}{fC}\left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n\right)$$
$$= \frac{1}{350[\mathrm{kHz}] \times 0.01[\mu\mathrm{F}]}\left(\frac{2}{3}20^3 + \frac{1}{2}20^2 - \frac{1}{6}20\right)$$
$$= \frac{5530}{3.5 \times 10^3} = 1.58[\mathrm{M\Omega}] \cdots\cdots (4)$$

計測用の20 MΩ抵抗分圧器が負荷R_Lとして接続されると，電圧降下の割合は，

$$電圧降下率 = \frac{R_{out}}{R_{out} + R_L}$$
$$\frac{1.58[\mathrm{M\Omega}]}{1.58[\mathrm{M\Omega}] + 20[\mathrm{M\Omega}]} = 0.073 \cdots\cdots (5)$$

となります．つまり無負荷時と比べ，7.3 %程度電圧が降下することが予想されます．

表1　段数と出力電圧のシミュレーション値(負荷なし)

段数[段]	接合容量非考慮[kV]	接合容量考慮[kV]
5	2.49	1.83
10	4.98	2.86
15	7.46	3.48
20	9.94	3.92

● 接合容量考慮と回路シミュレーション

実際に回路を製作する前に，LTSpiceを使用したシミュレーションを通して，接合容量付きのダイオード・モデルでどれだけの電圧降下がみられるか，また，出力インピーダンスの計算値が理論と一致するかを確認します．

▶接合容量を考慮する

今回選定したダイオードUF2010の接合容量について評価しますが，当該素子のデータシート記載内容は一般的な条件であるDC4 V・1 MHzでの測定条件のみです．今回の回路では，記載測定値よりもはるかに高い電圧が入力されるので，前提として記載値でのシミュレーション実行結果は，信頼性がありません．参考として，今回は記載値を設定しLTSpiceでシミュレーションを行います．

シミュレーションのようすを**図5**に，各モデルの5段，10段，15段，20段での出力電圧を**表1**に示します．出力側の負荷は切断し，無負荷状態として検証します．

接合容量考慮なしの回路では，ほぼ理論値となる出力電圧10kV近くが出ているのに対し，考慮モデルで

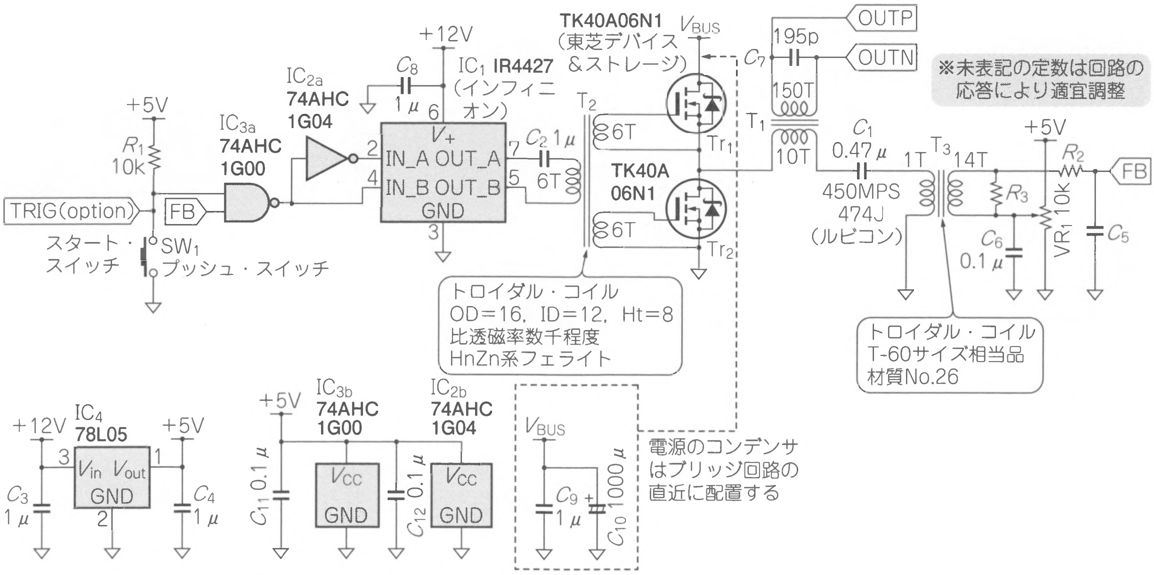


図6 CW回路へ入力する交流電圧を作るインバータの回路

は3.92kVと大幅に下がっています．電圧降下は段数を重ねるごとに大きくなる結果もわかります．

この結果はあくまでDC4Vで測定された接合容量をもとにシミュレーションしているので，結果はほぼワースト・ケースと捉えることができます．

今回の回路では一般的なインピーダンス・アナライザや*LCR*メータで印加可能なDCバイアス電圧ではないため実測も難しく，これ以上の評価ができないため，以上の参考程度の評価内容にとどめ，実機での測定結果と比較することとします．

▶出力インピーダンス理論値の検証

式(4)で導出した20段の出力インピーダンスの理論値が，シミュレーション結果と一致することを検証します．任意の負荷を接続し，出力電圧と負荷抵抗値から計算すれば求まりますが，最も結果がわかりやすい方法として，導出した出力インピーダンスと同値の負荷を接続することで，出力電圧が無負荷時と比較しおおよそ半分になることを確認します．なお回路モデルは接合容量を考慮しないモデルでの検証とします．

シミュレーションを実行しプロットから出力電圧の平均値を計測すると，結果は5.0055kVとなりました．無負荷時の理想的な出力電圧が10.0kVなので，計算での理論値がシミュレーション結果と高精度で一致しました．

● 測定用抵抗分圧器の設計

今回，CW回路の出力電圧を監視・計測するため，20MΩ，1000：1の抵抗分圧器を設計します．E24系列での組み合わせで，抵抗1本あたりの定格(W数ないし定格電圧)を超えない組み合わせとして，

$$680\mathrm{k\Omega} \times 28 + 510\mathrm{k\Omega} \times 1 + 330\mathrm{k\Omega} \times 1 + 100\mathrm{k\Omega} \times 1 : 20\mathrm{k\Omega} \times 1 = 19980\mathrm{k\Omega} : 20\mathrm{k\Omega} \quad \cdots\cdots (6)$$

で構成された設計にしました．

この分圧器を使うことで，抵抗の分圧式より，計測電圧V_Mは，

$$V_M = \frac{20[\mathrm{k\Omega}]}{19980[\mathrm{k\Omega}] + 20[\mathrm{k\Omega}]} \times V_{in} = 0.001 \times V_{in}[\mathrm{V}] \quad \cdots\cdots (7)$$

となります．テスタであれば，1Vの読み取りを1kVと読み替えることで，オシロスコープであれば，一般的な10：1プローブに接続する場合は，10000倍に設定することで測定できます．

なお測定器の入力インピーダンスは10MΩ以上であることが望ましく，測定に誤差となるようなインピーダンスの低い入力に接続する場合は，入力抵抗の高いCMOSのOPアンプなどを使用し，バッファを組むとよいでしょう．

● 交流電源回路(インバータ)の設計

CW回路で昇圧を行うには，入力となる交流(もしくはパルス)電圧が必要になります．今回は正弦波交流電圧500 $V_{p\text{-}p}$を入力するため，トランス付のハーフ・ブリッジ型*LC*直列共振インバータを設計しました．回路を図6に示します．

実験と測定①
動作試験と出力電圧測定

製作した回路で実験を行います．電源は最大20V 5A程度が出力できるものを用意し，計測はディジタル・オシロスコープを使用します．

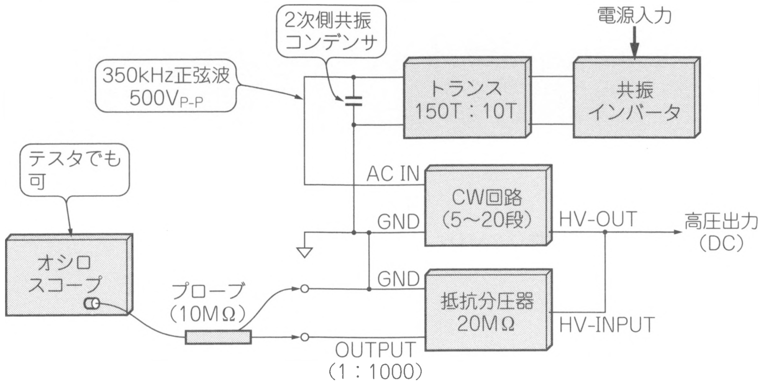


図7　実験回路の配線

なお実験は理論上最大10 kV程度発生します．感電にはくれぐれも十分注意し，パソコンやスマートフォンなど故障のおそれのある電子機器が付近にないことを確認して実験を開始します．

● インバータの波形を確認する

はじめにCW回路に入力するインバータ回路の出力を確認します．波形観測のため，オシロスコープのプローブをトランス2次側に接続，電源に5 V程度を入力し，基板上のスタート・スイッチを押します．**図7**に出力波形を示します．共振回路のため，抵抗負荷を接続すると系のQ値が低下し振幅が低下するので，負荷接続の際は適宜出力電圧を調整します．

● CW回路を接続する

一旦電源を落とし，トランス出力をCW回路の入力に接続します. 回路の段数は5段(基板1枚分)から始め，出力を確認したのち1枚ずつ基板を増やして実験を行います．CW回路の出力には抵抗分圧器を接続し，オシロスコープのプローブを分圧器の出力端子に接続します．オシロスコープの倍率はプローブ側スイッチを10：1にセットし，オシロスコープ側では10000倍に設定します．配線を**図7**に示します．

● CW回路の出力電圧を測定する

出力＋側の配線が他の導体や人体に接触していないことを確認し，十分に絶縁距離をとります．

インバータの電源装置の出力電圧を5 V程度に設定し電源を投入，インバータのスタート・スイッチを押します．次にインバータの出力電圧$V_{P\text{-}P}$が500 Vとなるように電源の入力電圧を設定し，再度出力電圧を測定します．

図8にオシロスコープで観測したインバータ出力波形，CW回路入力波形(トランス2次側出力)，抵抗分圧器を介して測定したCW出力波形を示します．**表2**，**図9**に5段，10段，15段，20段の出力電圧とそのグラ

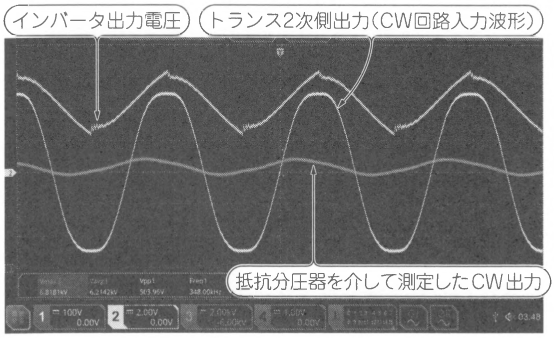


図8　オシロスコープで観測したインバータ出力波形，CW回路入力波形(トランス2次側出力)，抵抗分圧器を介して測定したCW出力波形

表2　段数と測定した出力電圧

段数［段］	実験回路の測定値［kV］	接合容量非考慮の理論値［kV］	接合容量を考慮したシミュレーション値［kV］
5	2.24	2.50	1.83
10	4.16	4.95	2.86
15	5.47	7.26	3.48
20	6.19	9.27	3.92

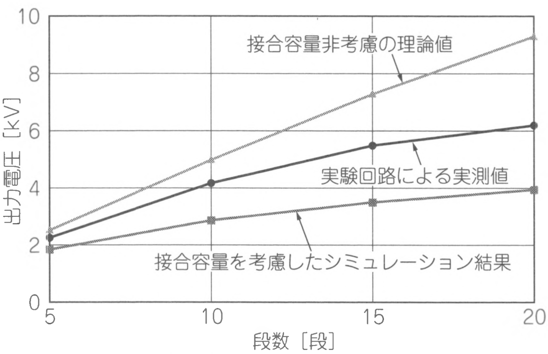


図9　CW回路の段数に対する出力電圧
負荷抵抗20 MΩを接続した回路における接合容量非考慮の理論値と接合容量を考慮したシミュレーション値も参考に表記している

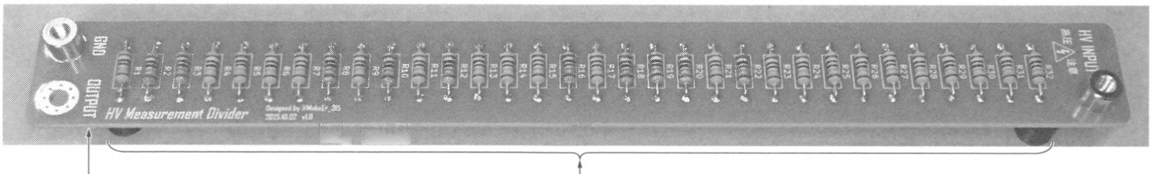


写真2　出力インピーダンス測定用負荷抵抗(3.2 MΩ)

フを示します．

実験から，入力の交流電圧に対し段を重ねるごとに昇圧されている結果が確認できます．また出力電圧は段数に対して線形的に上昇せず，段を増やすにつれ電圧降下が大きくなる測定結果についても確認できます．理論と設計での評価の通り，測定用の20 MΩの負荷および接合容量によって出力電圧の低下がみられました．接合容量のシミュレーション結果とその評価の通り，実際の出力電圧はデータシート記載値の接合容量を考慮した結果よりも大幅に高い電圧となりました．結果から，実測こそできませんが，逆方向電圧500 Vの条件においてはざっくり5pF程度まで容量が下がっているようです．

実験と測定②
CW回路の出力インピーダンス測定

実際に製作したCW回路の出力インピーダンスを測定し，設計の項にて見積もった値と比較します．

● 出力インピーダンスの求め方

回路の出力インピーダンスを実測で求めるには，出力に負荷抵抗を接続したときの電圧降下から算出します．

本実験回路では，電圧を観測するために既に20 MΩの抵抗分圧器が接続されており，これを取り外して電圧の測定を行うことができません．そのため，分圧器の抵抗値も考慮しつつ求める必要があります．

測定は抵抗分圧器R_1のみ接続した場合の出力電圧V_1と，既知の負荷抵抗R_1と抵抗分圧器R_2を並列接続した場合の出力電圧V_2を測定し求めます．算出は次の式により求まります．

$$R_{out}[\Omega]=\frac{V_1-V_2}{\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)V_2-\frac{V_1}{R_1}} \cdots\cdots (10)$$

● 測定方法

実験回路は，**写真1**のCW回路出力とGND間に抵抗負荷を追加して並列に接続したものとなります．

測定には高電圧用の負荷抵抗が必要なので，抵抗分圧器用の基板の抵抗実装部にすべて100 kΩを実装した抵抗負荷(3.2 MΩ)を製作しました(**写真2**)．

まずCW回路に抵抗分圧器(20 MΩ)のみを接続したときの平均電圧を測定します．次に抵抗負荷(3.2 MΩ)を20 MΩの抵抗分圧器と並列接続し測定します．

この実験では負荷が大きく変動するため，自励発振インバータ部の負荷による周波数変動が大きく発生します．そのため例外的に外部発振器による350 kHzの一定周波数での駆動とし，入力振幅は負荷を接続後に手動で調整する方法をとりました．

● 測定結果

測定から，

V_1 = 6.190 kV，V_2 = 4.220 kV

を得ました．式(10)より，実験回路の出力インピーダンスR_{out}は，

$$R_{out} = \frac{6.190[\text{kV}]-4.220[\text{kV}]}{\left(\frac{1}{20.0[\text{M}\Omega]}+\frac{1}{3.20[\text{M}\Omega]}\right)4.220[\text{kV}]-\frac{6.190[\text{kV}]}{20.0[\text{M}\Omega]}} = 1.604[\text{M}\Omega] \cdots\cdots (11)$$

と算出できました．

式(4)で求めた出力インピーダンスは1.58[MΩ]なので，ほぼ理論値通りの結果です．

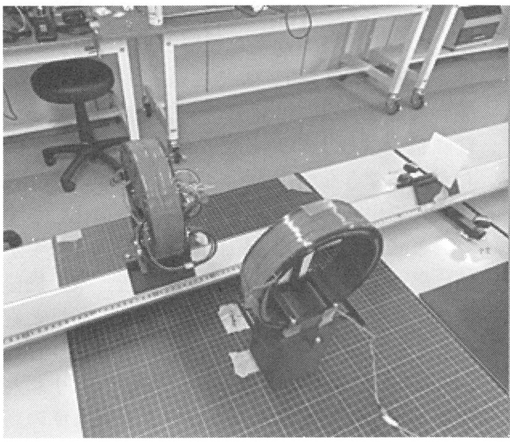
最後に一言

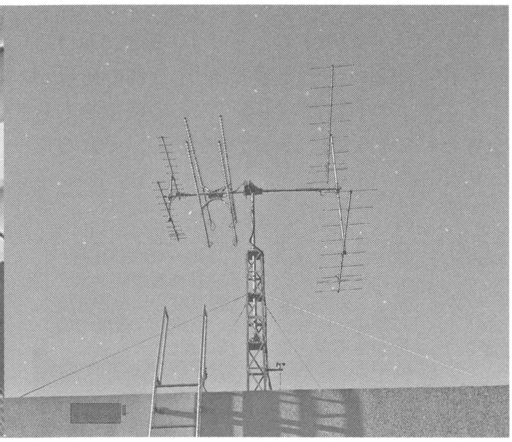
本実験は，部品を並べる回路の一例として，コッククロフト・ウォルトン(CW)回路について動作原理からシミュレーション，設計，実験を通じて解説しました．シンプルな回路構成だからこその手軽さがありますが，多段構成は出力インピーダンスが急激に上昇し，段数の恩恵を受けづらく，接合容量などによりシミュレーションでの出力電圧の正確性が得られないなど，設計の難しい一面もある回路です．

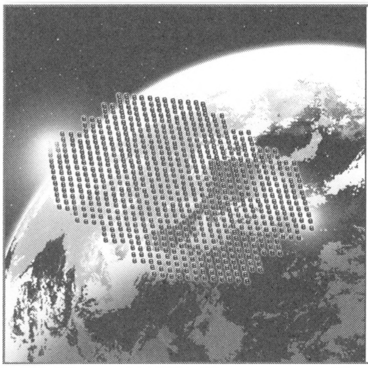
しかし，高電圧の発生用途からちょっとした簡単な昇圧電圧源としての使い道まで，用途がマッチすれば使いどころはさまざまです．回路設計の引き出しの1つとして製作の一助となればと思います．

第3部

高性能
アレイ・アンテナ
＆基本数理







第1章　超高性能！宇宙用フェーズド・アレイ・アンテナの研究

超小型衛星を多数並べて宇宙に超大型アンテナを作る

森岡 澄夫 Sumio Morioka

本稿では，近未来の実用化を目指して基礎研究が活発化している，宇宙通信用超高性能アレイ・アンテナを紹介します．「エレキ万博2025」に続き，どのような技術検討が行われているかを説明します．

超小型衛星を並べた超大型アンテナで広がる世界

● 超小型衛星を多数用いて大型アンテナにする

紹介するアンテナのイメージ図を**図1**に示します．やろうとしていることは，非常に利得の高いアンテナを宇宙に設置し，通信衛星として利用することです．

しかし，従来の通信衛星とは著しく異なる発想を使います，それは，数cmの大きさの超々小型衛星，つまりキューブサットよりも小さい衛星を多数集めて飛ばし(編隊飛行，あるいはフォーメーション・フライトと呼ばれる)，それを利用することです．**図1**におけるそれぞれの粒々が超々小型衛星であり，1個の衛星がアレイ・アンテナの1素子～数素子ぶんの機能をもちます．全体として1万個以上の衛星を使い，それらを数cm～数十cm間隔で配置して，直径20～数十m級の強力なフェーズド・アレイ・アンテナを構成します．

このような規模の宇宙アンテナは，機械設計上のさまざまな限界から，現実的コストでの構築が従来困難だったものです．しかし編隊飛行を用いれば，さらに大きくすることも決して不可能ではありません．

なお，実際には**図1**のようにすべてが同一の超々小型衛星ではなく，軌道制御用のスラスタをもつ衛星(アンカ衛星)や，やや形状/機能の異なった衛星が混在することになりそうですが，ここでは詳細は割愛します．

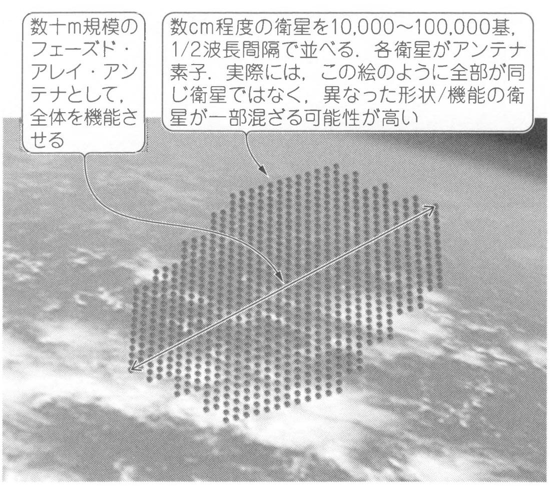


図1　超小型人工衛星の編隊飛行(フォーメーション・フライト)**を用いた大規模宇宙アンテナ構築の構想**

● 地上並みの高速ネットワークを衛星通信で実現する

この編隊飛行アンテナを高度数百kmの地球低軌道(LEO；Low Earth Orbit)に配置し，地上系ネットワーク(TN；Terrestrial Network)では到達できない地域にあるさまざまな端末機器とTNとの橋渡しをさせます(**図2**)．つまり，非地上系ネットワーク(NTN)の構成要素とするわけです．また，低軌道上を移動する編隊飛行は地上のサービス地点の上空に約10～15分しか滞在できないため，常時接続できるよう複数の編隊飛行を用意し，コンステレーション化します．

ここまでは有名なStarlinkなどと同じですが，決定的に異なるのは通信速度です．最近，地上機器に追加アンテナなどを取り付けることなく，衛星と直接に通信ができるサービス(いわゆるD2D；Direct-to-Device)が登場していますが，現水準よりも大幅に性能アップし，地上系ネットワークと同水準の高ビットレート，低遅延，遅延保証型のD2D通信が可能になります．これは，**図1**なみに衛星側アンテナを強力にすることで，初めて達成できることです．

このような高性能D2Dが可能になると，あらゆる地域でのブロードバンド接続が必要な産業サービス，例えば遠隔運転や自動運転，広域屋外センシング(CPSなど)の実現が，一気に現実味を帯びてきます．

● 構想は古くからあるが実装可能になったのは最近

図1のような編隊飛行アンテナのアイデアは，特定

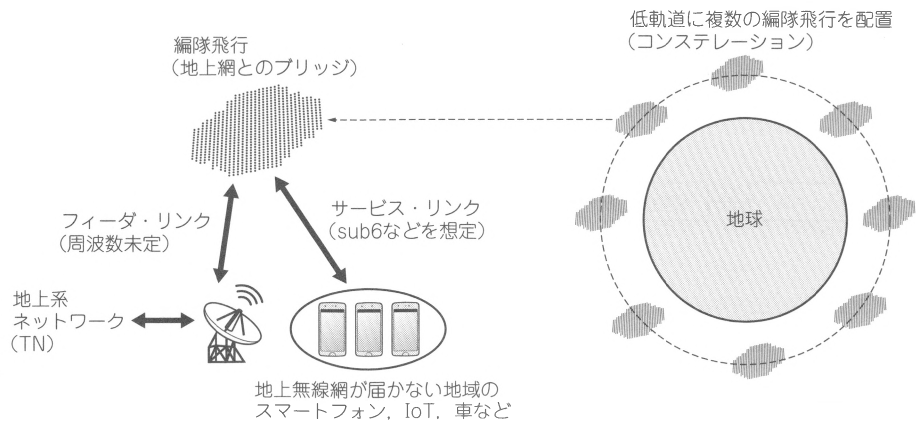


図2　編隊飛行をさらにコンステレーション化して常時接続を実現する

の個人による発明ではなく，最近になって出てきたものでもありません．多数の衛星を利用して複雑/高機能なミッションを行うアイデアは，20年以上前からさまざまな文献で示されてきました［例えば文献(2)］．

しかしその実現には，衛星の小型化/低価格化はもちろん，高機能な情報処理/通信処理を詰め込むための組み込み実装技術の進歩や，強力な社会的ニーズの発生が欠かせません．このため，真剣に検討できるだけの技術上/事業上の素地が整ってきたのは，ようやくつい最近のことです．

● 一見すると荒唐無稽だが成立性は十分にある

筆者が属する企業では，編隊飛行アンテナの提供を事業上の重要目標としており[3]，複数の国内大学，国立研究機関，企業とグループを組んで，2024年下期から総務省の委託研究[4]，2025年上期からJAXAの委託研究[5]をそれぞれ受託しています．編隊飛行アンテナが通信システムや衛星システムとして現実に実現可能か基礎検討することが，これらの研究活動の目的です．

図1だけではなんとなく空想世界の産物のように感じてしまいますが，実現性があることはすでに判明してきています．例えば，超々小型衛星群を使って達成可能なビーム送信出力や実効輻射電力(EIRP；Equivalent Isotropic Radiated Power)などを推定したところ，sub6帯(6 GHz未満)やband3(1.7 G～1.8 GHz)では回線成立する見込みです[6, 7]．

受信フェーズド・アレイ・アンテナの方式研究

● 本当にアンテナ実現が可能かを検討中

筆者グループが総務省研究[4]で行っている基礎研究について，もう少し具体的に紹介します．

研究の主テーマは，**図1**のように超々小型衛星をアンテナ素子として並べたとき，sub6/band3帯のD2D送受信用フェーズド・アレイ・アンテナとして機能させるにはどうすればよいかについて，最初の道筋を描くことです．本システムを実現させるうえで，もっとも根本的かつクリティカルなテーマです．なお，以下に記す内容はあくまで基礎研究であって，即座に実用に供することができる水準の製品開発をしているわけではない点に十分に留意してください．

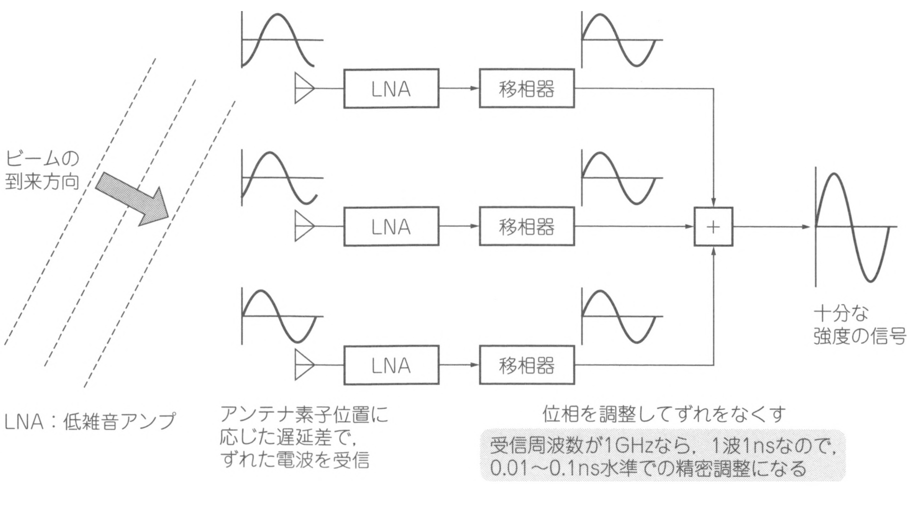


図3　一般に広く使われているフェーズド・アレイ・アンテナの原理(受信時)

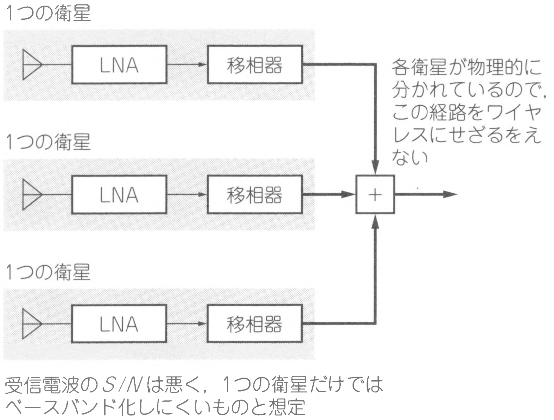


図4　編隊飛行アンテナでは各素子(衛星)の受信情報の合成方法が課題

● 編隊飛行アンテナでは素子間処理をワイヤレス化しなければならない

フェーズド・アレイ・アンテナの受信動作を衛星群に行わせることについて，考えてみます．フェーズド・アレイ・アンテナの受信原理は，アンテナ素子ごとの波面の到達時間に差があるため，移相器で調整してずれをなくしたうえで加算(合成)するというものです(**図3**)．

この原理は編隊飛行アンテナであっても変わりませんが，一般的なフェーズド・アレイとの最大の違いは，アンテナ素子(衛星)が有線接続されないため，合成処理のワイヤレス化が必要になる点です(**図4**)．

● GHz帯電波の受信はタイミングの正確な把握がネック

ワイヤレス化の方法としてさまざまなアイデアが浮かびますが，受信電波がGHz帯と速いことからいくつかの難点が生じます．

通常，フェーズド・アレイ・アンテナでは素子間隔を1/2波長にします．例えば，受信周波数が1 GHzのとき素子間隔は約15 cm，時間差にして0.5 nsです．隣接素子間に存在するこの差を，移相器または遅延器によって解消してから加算をします．ここで位相調整の精度要求を10°(やや緩めの想定)とするならば，時間換算で約28 psの精度で加算タイミングを管理しなければならない，ということになります．

ここでもし，編隊飛行アンテナで同じ処理を素直にしようとすると，衛星から衛星への無線伝送時間をこの精度で管理することになってしまいます．例えば，**図5**のように衛星から衛星へ情報をホップしていくとして，変調，伝送，復調の一連の処理時間(破線で囲った部分)を数十ps精度で調整管理することになるわけです．これは至難の業です．

このような場合，一般的には，搬送波/変調波レベルでタイミングを合わせ込もうとするのではなく，ベースバンドへダウン・コンバージョンして時間精度要求を緩和する対策がしばしば利用されます．

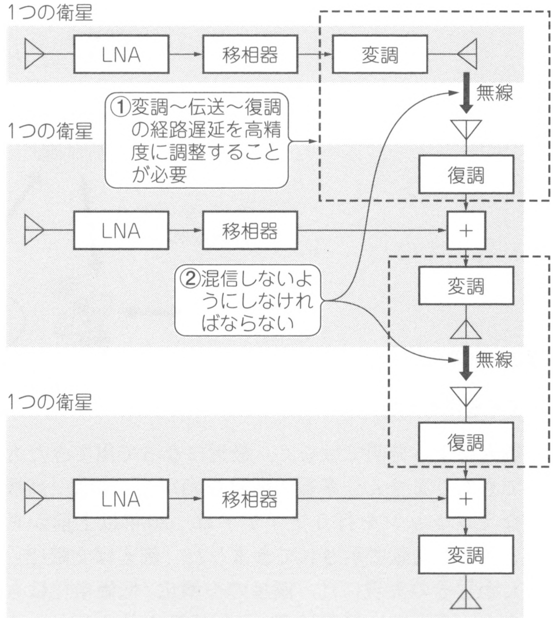


図5　素朴に衛星間で無線伝送しながら合成しようとしても，正しく動くようにするためのタイミング管理等が非常に難しい．ディジタル処理化してパケット伝送するようなことは帯域確保上困難で，混信も懸念される

● 情報伝搬のトポロジも難易度に強く影響する

しかしダウン・コンバージョンしたとしても，**図5**のようなホップ構成をとった場合，時間管理はそれなりに厳しい状況です．

例えば，ベースバンド20 MHzであったとしても，約1.4 nsの精度(先と同じく位相精度10°のとき)で衛星間の順次伝送/加算タイミングを合わせ込む必要があるからです．かつ，複数の衛星があるため衛星間通信が同時発生しますが，それらの混信も懸念されます．

以上を総括すると，処理遅延や衛星動作タイミングの正確な合わせ込みと，情報伝送のトポロジ決定が，受信において重要な検討ポイントになるということです．筆者らのグループでは，先述の通信速度/処理速度要求のもとでは，ディジタル信号処理やディジタル通信の利用は非現実的と考えています．

● 今のところ空間合成方式が有力候補と考えている

現時点において，**図6**の方式がもっとも実現性が高いと考え，基礎実験と詳細分析を進めています[7]．これは，衛星間ホップによって合成を進めるのではなく，全衛星から特定の親衛星へ向けて同時に情報送信を行い，親衛星の受信アンテナで加算を行うことによって(空間合成と呼ぶ)，できる限りシンプルな方式としたものです．

また，この衛星間伝送に利用する周波数帯について

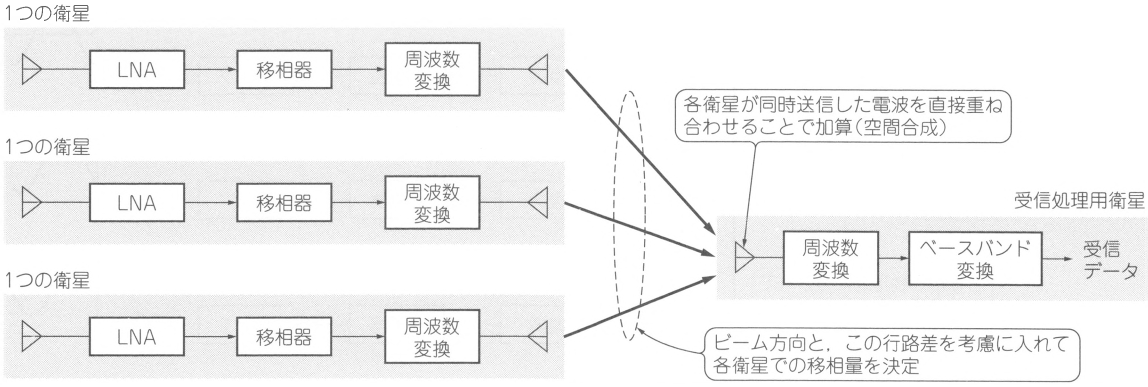


図6　現時点において比較的実現性が高いと予想し，実験を進めている受信方式

も比較検討を進めており，ベースバンドなどへのダウン・コンバージョン案のみならず，アップ・コンバージョン案も候補としています．さらに，空間合成に無線ではなく光を使う案も検討しています．

送信フェーズド・アレイ・アンテナの方式研究

● 送信処理においても衛星間伝送をワイヤレス化

受信に続いて，フェーズド・アレイ・アンテナの送信動作を行わせることについて考えます．送信動作は受信のちょうど裏返しになっており，全アンテナ素子に変調波を分配します．これも各アンテナ素子の移相量を調整することで，合成波面，つまりビームの方向を調整できます(**図7**)．

編隊飛行アンテナの場合は，衛星が物理的に分かれているため，有線接続によるアンテナ給電ができません．受信の場合と同じく，無線または光によるブロードキャストを行うことになります(**図8**)．

● 衛星間の動作を精密に合致させることが最大の難関

以下，話をシンプルにするため，真正面にビームを出す場合(ビームのステアリングをしない場合)について説明します．

送信動作において最も重要な要求は，全衛星がぴったり同一時刻に，同一位相，同一周波数の変調波を出さなければならないということです．これが満たされなければ，そもそもフェーズド・アレイ・アンテナとして機能させることができません．しかも時刻については，ベースバンド速度ではなく出力の変調波速度のもとで，つまり1 GHzならば受信と同様に数十ps精度で合わせなければなりません．

● LOを衛星ごとにもつことによって問題が生じる

しかし編隊飛行アンテナにおいては，衛星(アンテナ素子)が切り離されているため，上記の要求を満たすことは容易ではありません．

それを図解しているのが**図9**です．**図8**のとおりにワイヤレス化を行い，送信データをもっている親衛星(**図8**の左側)が出力変調波(以下Wとする)を作るものとします．親衛星はWを各衛星にブロードキャストするためにさらに変調を行い，各衛星は復調によってWを得て，自分のアンテナ(**図8**右側)から送出します．

ここでまず，親衛星出力から各衛星の出力までの遅延時間を高精度にそろえなければなりません．必要精度は，変調波Wが1 GHzなら先述のとおり数十ps水準です．受信時と同じく，衛星によって親機との距離が異なるため，その遅延差分を移相器で補正しなければなりません．

次に，全衛星について出力の周波数と位相を完全に合わせなければなりませんが，それは復調に用いるローカル・オシレータ信号(LO)が一致していないと困難です．ローカル・オシレータ信号の生成源(水晶など)を衛星ごと別々に載せると好ましくない影響が出てくるということです．実際に，各衛星のLO周波数に微小な(例えばppb単位の)ばらつきがあるだけでも，衛星同士の出力位相はすぐにずれていってしまいます．

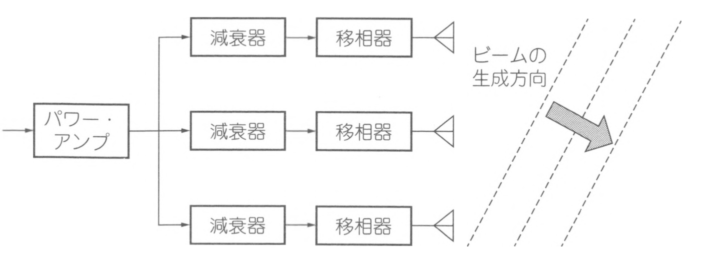


図7　一般に広く使われているフェーズド・アレイ・アンテナの原理(送信時)

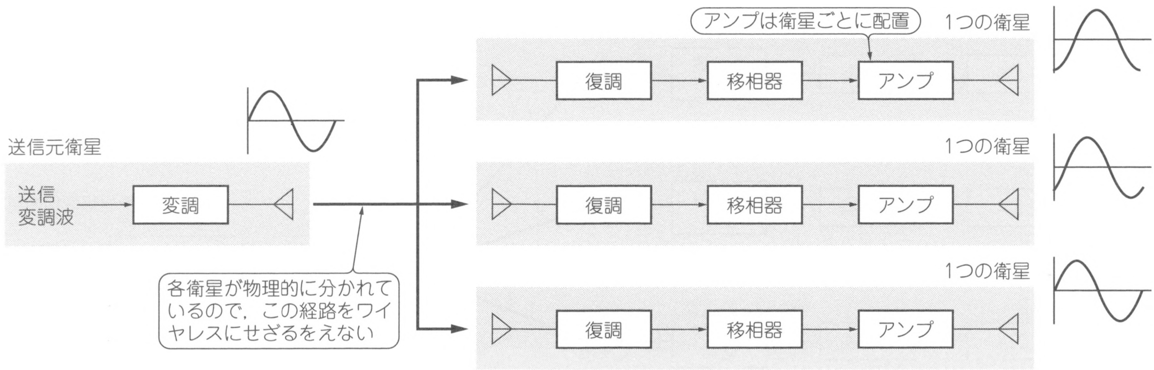


図8　送信データの全体共有をワイヤレス通信で行うことになる

● ディジタル処理利用もできるがタイミング調整は難しい

ここまでの説明とは別の方式として，親機から各衛星へのデータ共有をディジタル通信で行う案も取りえます．例えば図10のように，いったんデータを各衛星内部のバッファにストアしておき，別の時刻トリガ信号で一斉送信するような方式が考えられます．

しかしこの方式でも，図9における出力合致の課題が解消されるわけではありません．むしろ逆に，ディジタル処理系(バッファの読み出しやD-Aコンバータなど)の動作タイミングを正確に合致させなければならず，システムとしての設計難易度が一層上がってしまう可能性があります．

● 今のところLOブロードキャスト方式が有力候補

筆者らのグループでは，ローカル・オシレータ信号LOを親衛星からブロードキャストする案を主力候補として詳細検討中です(図11)．ここで各衛星の移相器に設定する調整値は，出力ビーム方向と，変調波Wやローカル・オシレータの行路差(遅延差)の組み合わせから導出します．

また，変調波WとLOを別々の経路とせず，自己ヘテロダインによってまとめて伝送する方法や，衛星間ブロードキャストを光で行う方法についても候補としています．

ほかに研究を進めている主要項目

衛星群をフェーズド・アレイ・アンテナとして機能させる方法以外にも，重要な要研究項目はたくさんあります．以下，現時点において具体的な研究を進めている重要項目について説明します[(6), (7)]．

● リアルタイム・ビーム・フォーミング手法

編隊飛行は地球低軌道に配置するため，地上から見ると，地平線から現れて上空に昇り，また地平線へ向かって沈んでいく動きをします(図12)．

このため，編隊飛行から通信地域を狙って生成する無線ビームについて，その方向をリアルタイム調整する必要があります．この角度調整に求められる精度は，地上のビーム照射範囲(フット・プリント)の位置精度要求に依存しますが，図13に例を示すように高い値です．

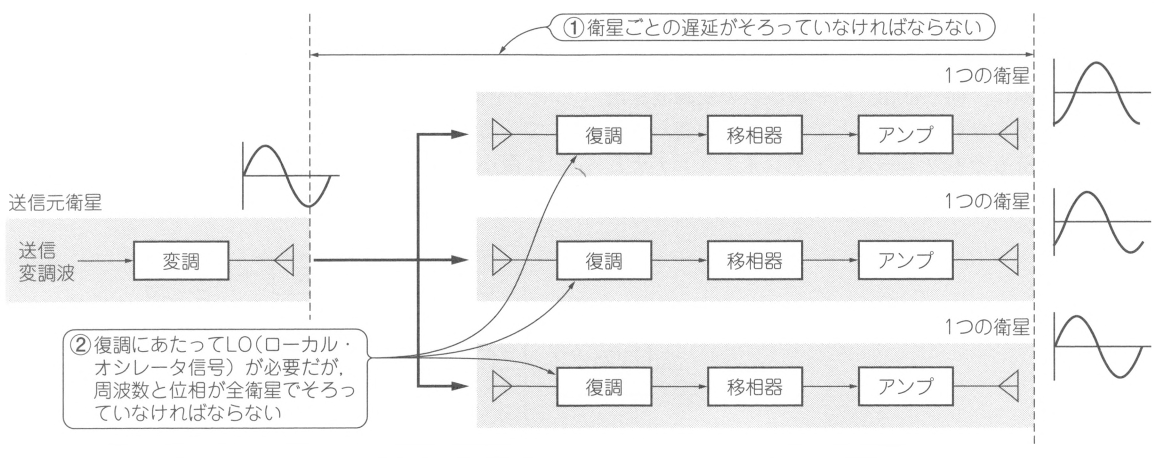


図9　全衛星の変調波送出タイミング，周波数，位相を完全に合わせることが送信処理上の課題

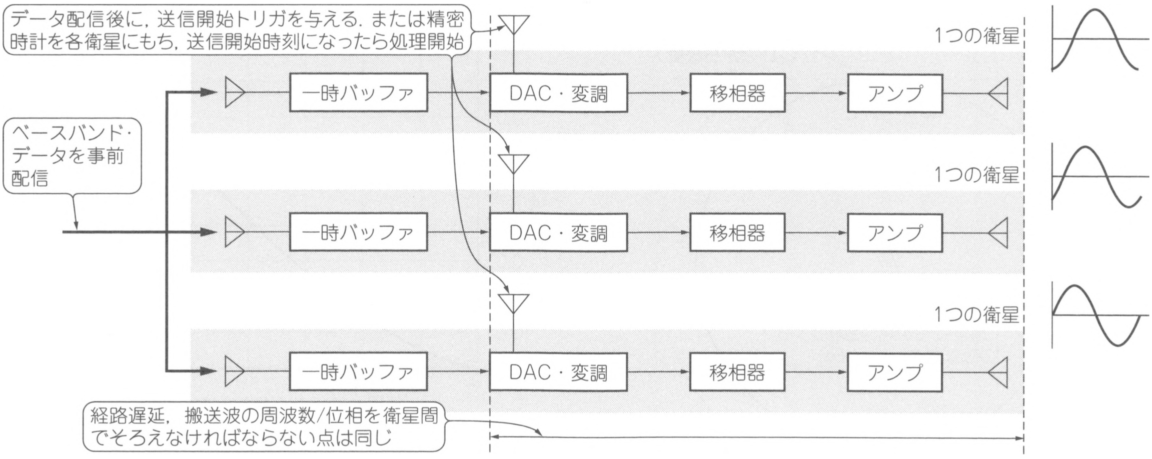


図10　送信ではディジタル処理を使う選択肢もありえるが，衛星動作を一致させる点では逆に難易度が上がる可能性がある

ビームを正確な方向に出し続けるためには，編隊飛行の現在位置や姿勢を正確に測定し，それに基づいて各衛星で行うべき移相量など(いわゆる励振ウェイト値)を高速に導出し，各衛星にセットするという制御ループをリアルタイムで回し続ける必要があり，その方法を研究しています．

また，アレイ・アンテナのアンテナ・パターンにはいくつもの余計な山(サイド・ローブ，不要放射)が現れますが，その低減方法についても検討しています．

● 編隊飛行の安定維持手法

本稿では割愛しますが，**図1**のように衛星を高密度に編隊飛行させることも，重要性と独創性のきわめて高い研究テーマです(5)．

その実現方針は次のとおりです．通常，2つの衛星が別々の異なる軌道にあればばらばらに離れていってしまいますが，両者の軌道をうまく設計すれば相対位置(距離)を一定に保てることが知られています(2)．これは衛星が2個ではなく多数の場合にも拡張可能です．

そのような軌道設計の仕方は多数存在しますが，わかりやすい一例として，**図14**のように地表に対して30°傾いた平面内に衛星を配置する方法が知られています．地上からは，衛星群が平面内で自転しているように見えることから(単にそう見えるだけで，遠心力などを使っているわけではないので注意)，レコード盤軌道とも呼ばれます．

ここで，各衛星をレコード盤軌道に配置したとしても，地球の形状や大気抵抗の影響などにより，ゆっくりですが配置乱れが発生してきます．これを補正するためには小型の電磁石を用います．

● 超々小型衛星に搭載するための低電力/高集積処理系

以上に述べた無線や編隊飛行制御の処理は，それぞれの超々小型衛星の上で実行されます．太陽電池の面積が小さく発電能力が限られるので(目安として数百mW程度)，無線や飛行制御の処理系における低電力

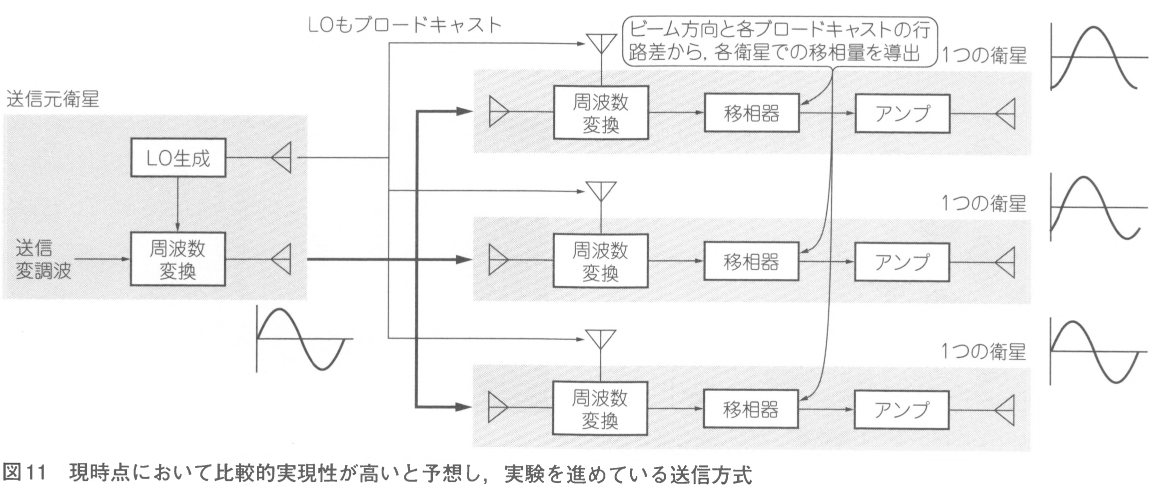


図11　現時点において比較的実現性が高いと予想し，実験を進めている送信方式

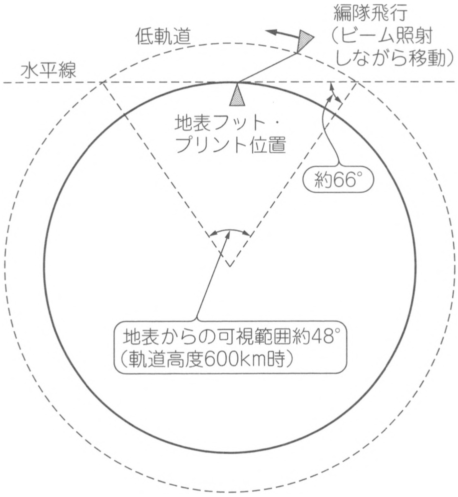


図12 低軌道を飛ぶ衛星ではビーム方向のリアルタイム修正が必要

化が重要な課題となります．このため，専用設計のチップないしチップレットとすることを想定し，実装手法の研究を進めています．

● 諸アルゴリズムを開発するための高精度シミュレータ

無線制御や飛行制御のアルゴリズムは，1万～10万基の衛星を制御するものであり，かつ，それらの衛星の上で分散実行することを想定しています．

こうしたアルゴリズムの開発や検証を，宇宙空間でぶっつけ本番で行うわけにはいきません．したがって，軌道飛行での微細な外乱，電磁石制御の効果，無線制御によるビーム・フォーミング精度などをきわめて高精度に評価できるシミュレーション環境についても研究を進めています(7)．

おわりに

本稿で紹介したのは，本編隊飛行アンテナ・システムに必要な研究の一部に過ぎません．これから着手しなければならない重要テーマも数多くあり，筆者の所属企業(3)では一緒に研究開発を行っていただける組織，個人を歓迎しています．

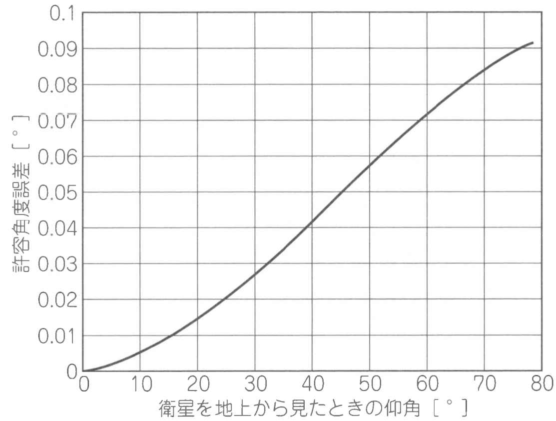
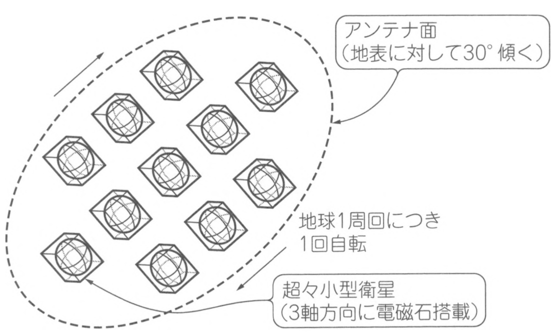


図13 ビーム方向調整には高い角度精度が必要
高度：600 km，許容フット・プリントずれ：1 km

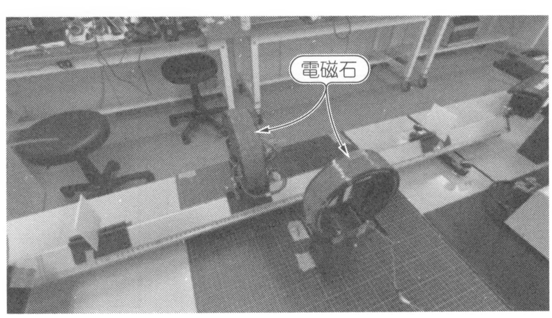
◆参考文献◆

(1) https://toragi.connpass.com/event/356203/presentation/(「エレキ万博2025」，スライド集)
(2) 中須賀 真一；宇宙機のフォーメーションフライト，システム/制御/情報，Vol.45，No.10，pp.574-579，2001.
(3) https://www.istellartech.com/satellite/ourstars(本構想)
(4) https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000513.html(総務省が実施するアンテナ構築の基礎研究．体系的番号JPJ000254)
(5) https://fund.jaxa.jp/techlist/theme16/(JAXA宇宙戦略基金が実施する編隊飛行技術の基礎研究．体系的番号JPJXSSF24MS09003)
(6) 森岡 澄夫，稲川 貴大；高速D2D通信向け多数機編隊飛行の産業インパクトと研究状況，第69回宇宙科学技術連合講演会1E01，2025年11月．
https://smartconf.jp/content/sstc69/program_list
(7) 森岡 澄夫，稲川 貴大，本間 尚樹，山口 弘純，白根 篤史；(招待論文)大型編隊飛行を用いた高速ダイレクト通信衛星の方式検討，電子情報通信学会論文誌A，Vol.J108-A，No.6，pp.128-142，Nov. 2025.
https://search.ieice.org/bin/index.php?category=A&lang=J&curr=1

もりおか すみお
https://researchmap.jp/sumio_morioka

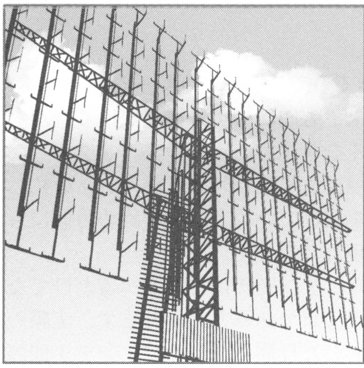


(a) レコード盤軌道



(b) 電磁石を使った実験のようす

図14 編隊飛行において衛星配置を低電力で安定維持するため，レコード盤軌道と電磁石を併用する



第2章 アンテナ向き電磁界シミュレータ MMANA-GAL入門

電磁界解析でつかむ 複数アンテナの指向性

中山 大輔 Daisuke Nakayama

アンテナは空間を伝搬する電波を高周波電気信号に変換する装置です．このアンテナを複数並べるとどのようなことが起こるのでしょうか．

本稿では，アンテナを並べるスタック技術の原理を解説します．アンテナを並べて1つの送受信システムにしたものをスタック・アンテナと呼びます．フリーの電磁界シミュレータMMANA-GALを使ったスタック・アンテナのシミュレーションを行います．

アンテナの不思議…2つ使うと「効率」(量じゃなく)を2倍にできる

アンテナ(Antenna)の語源はラテン語の昆虫の触角から来ていると言われています(1)．まさに空間中を伝搬する電波を識別する装置です．アンテナは他の電子部品と違って，回路的な振る舞いだけでなく電波を発生させる電波源としての振る舞いが特徴です．

例えば，LEDを2つ並べて光らせると，2倍の消費電力で2倍の光量となるので，消費電力に対する光量の効率という意味では変化しません．しかし，アンテナは2つ横に並べて給電すると，同じ消費電力で2倍の電波放射になることもあります．つまり2倍の効率で正面に電波を放射できるようになるのです．

どうしてこのようなことが起きるのでしょうか．本章では，アンテナを並べた際の不思議な現象について，基礎的な原理とシミュレーションで確認していきます．

今回の複数アンテナ解析の前提

● アンテナと電波の関係

アンテナから放射された電波は，アンテナを中心として四方八方に飛んでいきます．電波は電磁波の一種で，**図1**に示すように電界の波と磁界の波の組み合わせで伝搬していきます．電波の伝搬速度は光と同じ速さで，およそ3×10^8 m/sです．これはおよそ1秒間に地球を7周半する速度で，宇宙で最も速い伝搬速度になります．

● 周波数は単一とする

一般に電波通信では1つの周波数を中心に通信を行います．ここでは**図1**に示すように，アンテナからは単一周波数の電波が出ているものと考えて進めていきます．

● 送信のみ＆どのアンテナも同じ振幅・位相とする

アンテナは電波の送受信ができますが，ここでは，簡単にするため送信をメインに解説します．ただし，アンテナの送信と受信の動作は，基本的には逆向きの現象が起きているだけで，同じ原理で説明できます．

それぞれのアンテナへ供給する信号の位相や振幅を変えることで，非常に複雑な制御ができますが，ここでは，最も単純な，すべてのアンテナに同じ位相，同じ振幅で信号を与えることを考えます．

2つのアンテナで向き(指向性)を変えられる基本メカニズム

● アンテナ間の距離が変わると横方向の強弱が変わる

アンテナを並べたときの電波の強さ(放射パターン)を視覚的に見てみます．簡単な放射パターン・シミュレータSonnetを使いました(2)．

シミュレーションのモデルは，いろいろな方法で作ることができます(注1)．スタック・アンテナについても重要な洞察を得ることができます．

注1：今回の図はスライド作成ソフトウェアで半透明の同心円をたくさん描いて並べてみた．

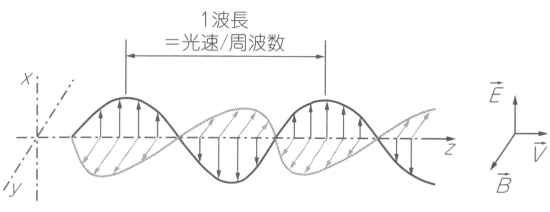


図1　アンテナの前に…電磁波の伝播イメージ
電界Eと磁界Bの波が伴って伝搬する

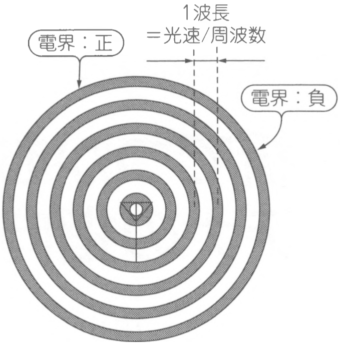


図2　電磁波は基本中心(アンテナ)から同心円状に放射される
色の濃いところが電界が正，白いところは電界が負

図2に示す同心円上に書かれた縞模様がシミュレータの基本です．中心にアンテナが配置されていると考えて，そこから電磁波が放射状に出ているようすを示しています．縞の間隔は放射している電磁波の波長に相当します．波長は光速/周波数なので，周波数が決まれば波長も決まります．縞の色の濃い部分は，**図2**の電界が正の方向，縞の白い部分は電界が負の方向になります．

このシートを2つ横に並べてみます(**図3**)．すると，縞が濃くなるところとそうでもない方向が現れます．これはアンテナを2つ用意して，同時に電波を放射している状況に対応します．

横に並べるときの距離を変えてみると，上下方向にはどんな場合でも強いですが，横方向や斜め方向はアンテナの間隔によって異なります．これはアンテナ間距離を変えれば，放射をいろいろと変えられることを示しています．

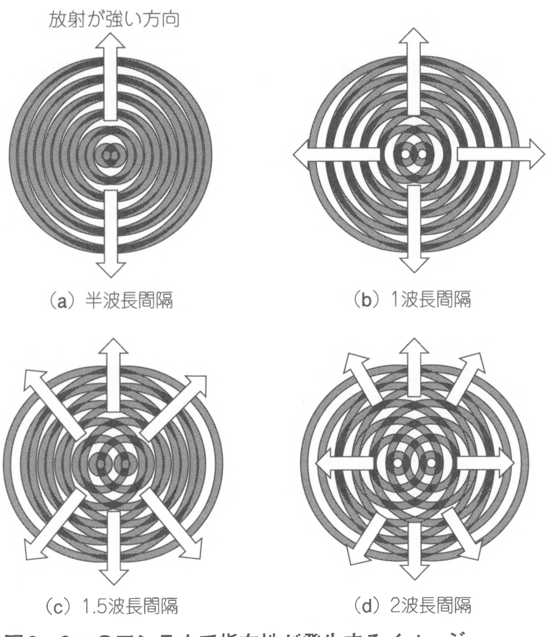


図3　2つのアンテナで指向性が発生するイメージ
アンテナの間隔によって放射の強い方向がさまざまに変化することがわかる

● 図が描ければ誰でもできるシミュレータ

半波長間隔だと上下方向にはよく電波が出て，左右方向には電波が弱くなります．実際のスタック・アンテナでも半波長間隔はよく使われる間隔の1つです．

アンテナの間隔を広げていくと，横や斜め方向にも放射の強い方向が現れてきます．

これらのことから，アンテナはただ並べるだけでなく，その位置関係が大事であるとわかります．実際のアンテナ設計では必要な性能に合わせてアンテナ間隔を選びます．例えば，横方向の放射を減らして正面からだけ受けたいときは，半波長間隔が使われますし，他の方向からも多少は受けていいから正面からの電波を最大で取りたいときは少し離したほうが良いこともあります．

このアンテナ・シミュレータはすぐに試せるため，直感的な理解を助けてくれますが，詳細な性能を説明することには向いていません．ここからは，フリーの電磁界シミュレータを使って，具体的なアンテナを並べて性能を見てみます．

フリーのアンテナ向き電磁界シミュレータMMANA-GAL

MMANA-GALはモーメント法を用いたアンテナ解析ソフトウェアです[3]．ベーシック・バージョンはアマチュア無線などの趣味や自己学習の用途であれば無料で使えて，ダイポール・アンテナや八木アンテナなどのワイヤで作られたアンテナに関して，強力なシミュレーション機能をもっています．

まずは435 MHz帯シンプル八木アンテナの放射特性を確認する

● 公開されている八木アンテナ設計を使う

作りやすい八木アンテナとして，JAMSAT(日本アマチュア衛星通信協会)が公開している設計[4]を使ってシミュレーションをしてみます[5][6]．八木アンテナを選んだ理由は，スタックによる効果が見やすいことと，八木アンテナのスタックは実用的にもよく使われているためです．このアンテナの設計周波数は435-438 MHzで，中心である436.5 MHzでは波長が約70 cm弱です．

図4に単一の八木アンテナのモデルを示します．エレメントと呼ばれるおよそ半波長の縦棒がX軸方向に6本並んでいます．このアンテナの全長は61 cmで，X軸方向が主な放射方向です．

シミュレーション結果を**図5**に示します．想定通り，X軸方向が主放射方向であることがわかります．アンテナの性能の1つとして最大ゲインがあり，同じ強さ

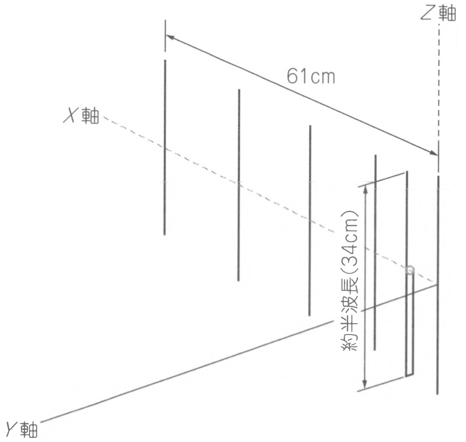


図4　JAMSAT 6エレ八木アンテナのシミュレーション・モデル
日本アマチュア衛星通信協会(JAMSAT)が公開している八木アンテナ

の高周波信号をアンテナに入れたとき，高周波信号を四方八方に均等に放射したときと比べて，最大で何倍強い放射を得られるかを示すものです．ただし，アンテナの世界では，倍率に対数を取ったdBiという単位を使います．電力の倍率をGとすると，

$$G_a = 10 \log(G) \ [\mathrm{dBi}]$$

という関係があり，逆に

$$G = 10^{(G_a/10)}$$

という関係も成り立ちます(注2)．

このシミュレーション結果では，$G_a = 11.03$ dBiとなりました．$10^{(11.03/10)} = 12.6$より，均等放射に比べて，12.6倍の電力がX軸方向に向かって放射されていることがわかります．このゲインは受信の際も同様の性能を示して，このアンテナのX軸方向を電波の到来方向に向けると，均等に受信するアンテナと比べて12.6倍の電力が受信できることを示しています．このアンテナを宇宙から飛んできた微弱な電波を拾うために使われており，単一でも高ゲインな設計になっています．

複数の八木アンテナを並べたときの効果解析

JAMSAT八木アンテナを横に並べて正面方向に高ゲインを得られるのか，シミュレーションをしてみます．**図6**のように2つのアンテナを並べます．この際，新たにシミュレーション・モデルを作る必要はありません．**図7**に示すとおり，「Make stack」機能を使うと，縦横方向にいくつアンテナを並べるのかと間隔を入れるだけで**図6**のようなモデルが作れます．

注2：対数表記は電流や電圧の比率に対しても定義されている．本章では混乱を避けるために電力の比率のみで考えていきます．

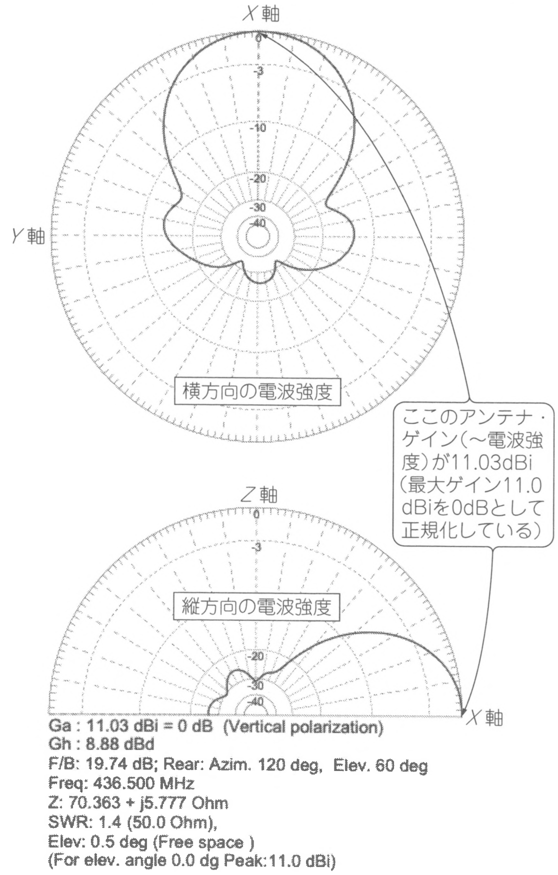


図5　単一の八木アンテナのシミュレーション結果
最大ゲインが11.0 dBiで，X軸方向に最大の放射方向をもっている

シミュレーション結果を**図8**に示します．比較のためにスタックしていないときのシミュレーション結果も示します．縞模様を使ったスタック・アンテナの説

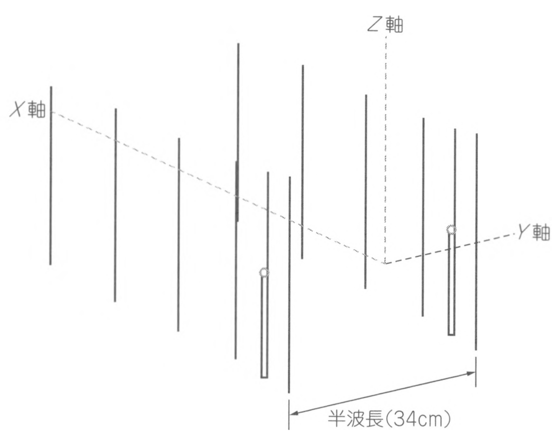
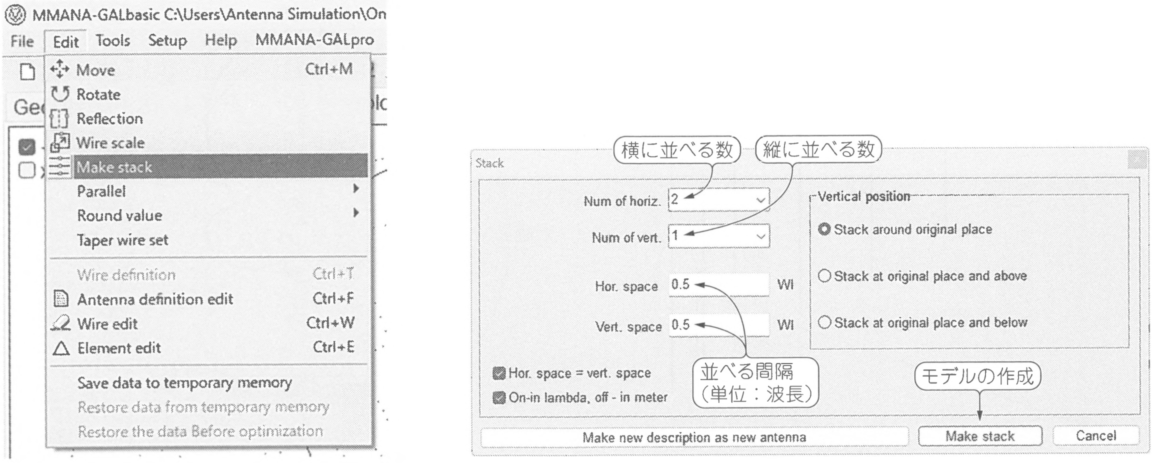


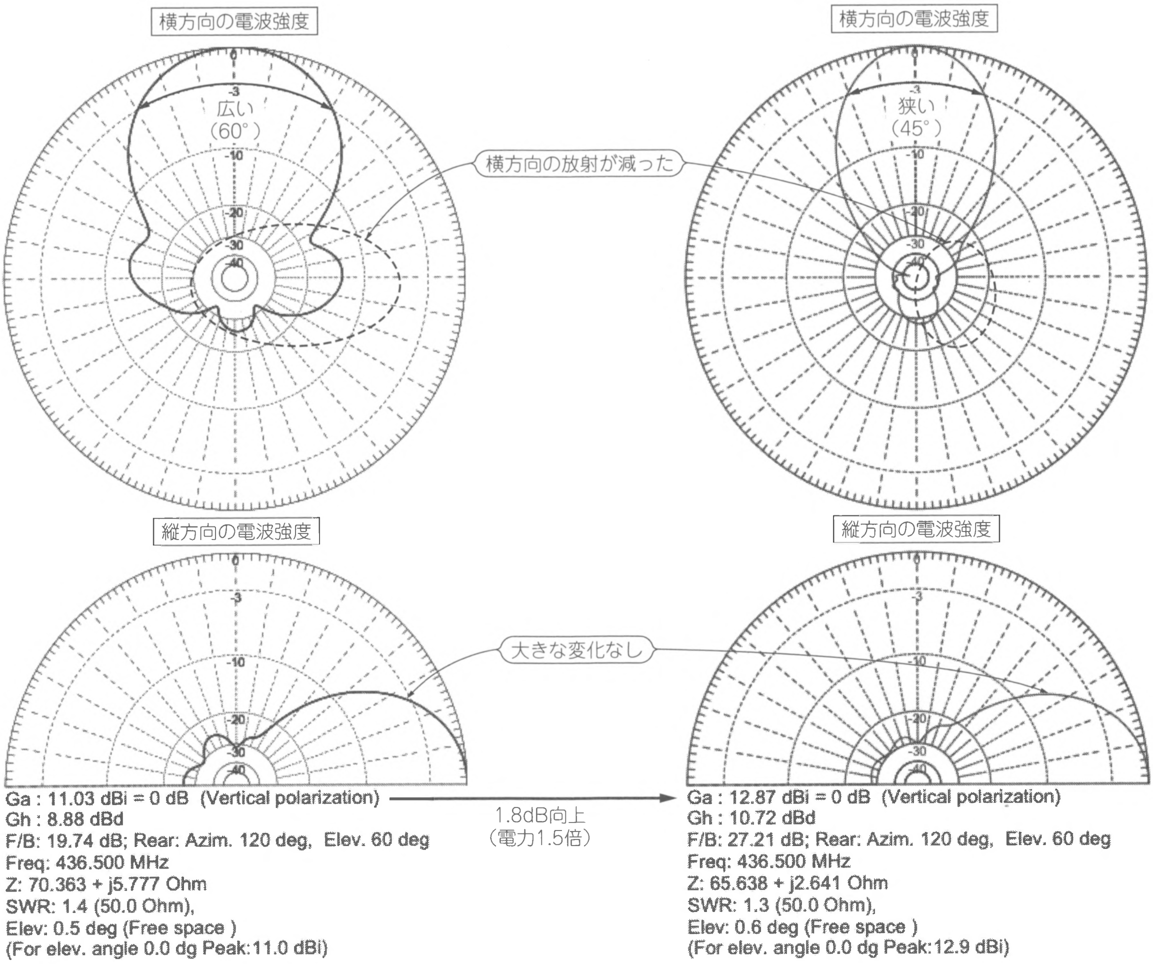
図6　JAMSATの6エレ八木アンテナのスタック・モデル
横方向(Y軸方向)に半波長間隔で2つの八木アンテナを並べた．MMANA-GALの機能で簡単に並べられる



(a) EditツールからMake stackを選択

(b) スタック・モデルの作成

図7 MMANA-GALでスタック・モデルを作る
Make stack機能を使って，簡単にアンテナのスタック・モデルが作れる



(a) 単一八木アンテナ

(b) 半波長2スタック八木アンテナ

図8 単一アンテナとスタック・アンテナ(横の距離は半波長)の比較
横にアンテナを並べたので，横方向のビーム幅が狭くなっている．縦方向の幅はほとんど変わらず，ビーム幅だけでなく，横方向の放射も抑えられている

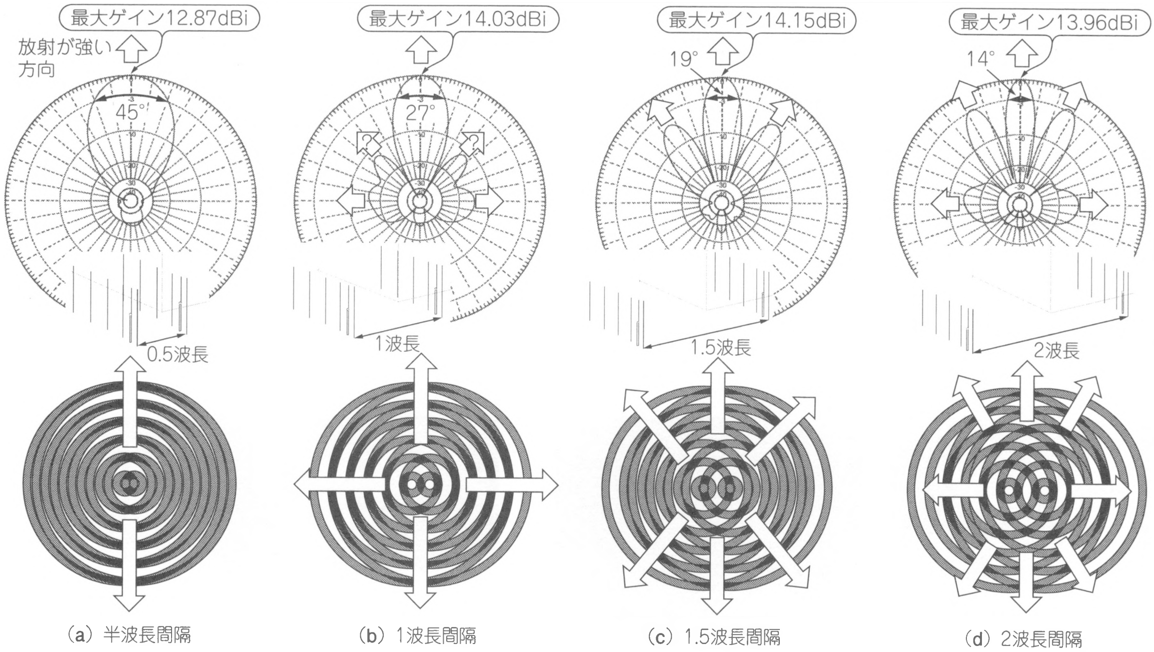


図9　横に2つ八木アンテナを並べたときの結果と縞模様シミュレータの比較
アンテナの間隔によって放射パターンが変化しているようすがわかる．また，縞模様とほぼ同じ方向に出ているようすも確認できる

明では，縦方向の放射が強くなるという結論でしたが，電磁界シミュレーションでも，縦方向の放射が強くなっています．利得の絶対値では，11.03 dBiから12.87 dBiとなり，およそ1.8 dBの向上(注3)，電力比で1.5倍に放射が増えています．また，最大放射方向から電力が半分になる，つまり最大放射方向から3 dB(注4)下がったところで見た半値ビーム幅で比べると，横方向では60°から45°に狭くなっており，正面方向に放射が集中しています．縦方向にはアンテナを並べていないため，放射パターンの形はそれほど変わっていません．さらに，単一の八木アンテナでは見られた横方向の放射も減っていることも縞模様の説明と一致しています．

● 並べる間隔を変えてみる

縞模様では，アンテナの間隔を変えると強め合う方向が変わると説明しました．シミュレーションでも同様の比較を行ってみます．**図9**にシミュレーション結果を示します．水平にアンテナを並べた時に垂直方向のパターンは変化しないことがわかっているため，水平方向のパターンと縞模様を並べてみています．八木アンテナ自身の放射パターンのため，前方か横方向にしか大きな放射はありませんが，およそ縞模様の説明の通りに電波の放射が起きています．また，半波長間隔では横方向の放射が抑制されるため，きれいな指向性ですが，最大のゲインを得るためには，1.5波長程度の間隔が良いことがわかります．主方向のビーム幅で見ると，間隔を広げるにつれて鋭いビームになっていますが，他の方向の放射も増えているので，そのバランスで1.5波長程度が最も良いゲインになっているようです．この時14.14 dBiで元々の11.03 dBiから比べて3.11 dBのゲイン向上になっています．電力量で考えるとおよそ2倍となっています．

一般にn個のアンテナをスタックしたとき，配線の損失などを無視するとゲインは$10\log(n)$[dB]程度向上する(電力量でn倍)ことが知られています．4つ横に並べたスタック・アンテナと2×2で並べたスタック・アンテナのシミュレーション結果を**図10**(p.140)に示します．ビームの絞られ方は違いますが，どちらも11.03 dBから4倍(+6 dB)程度の放射が正面方向に出ています(注5)．

注3：アンテナ・ゲインの単位のdBiでは差分はdBで示します．アンテナ・ゲインの単位dBiがアンテナの絶対的な性能を示しているのに比べて，差分は電力比で何倍などに相当するので，比率を示すdBで示します．

注4：デシベル(dB)の単位を使うとき，3 dB増えるのは電力2倍，3 dB減るのは電力半分に相当します．10 dB増えると電力10倍，20 dB増えると電力100倍です．このように，倍率では桁が多くなってしまう現象でも対数表記(dB)では比較的扱いやすい値で収まるためアンテナ・ゲインの表示などに使われています．

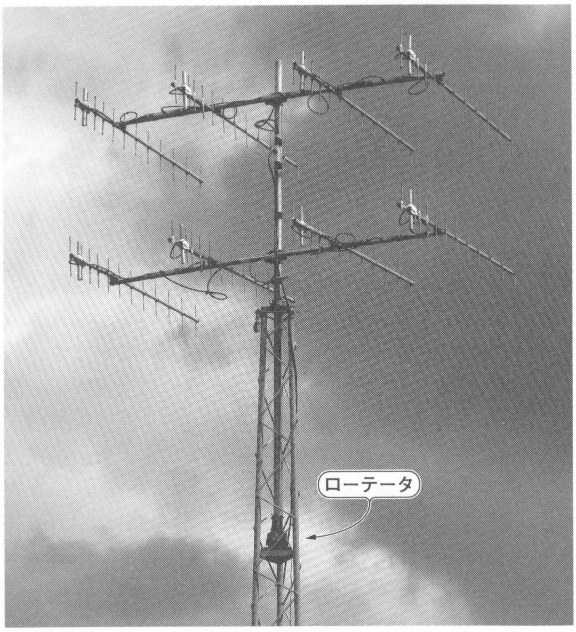
注5：アンテナは増幅器ではないので，実際には電力を増やしているわけではありません．その代わり四方八方に放射していた電波をある特定の方向(ここでは正面方向)に集中して放射しています．

コラム　スタック・アンテナは実際よく使われている

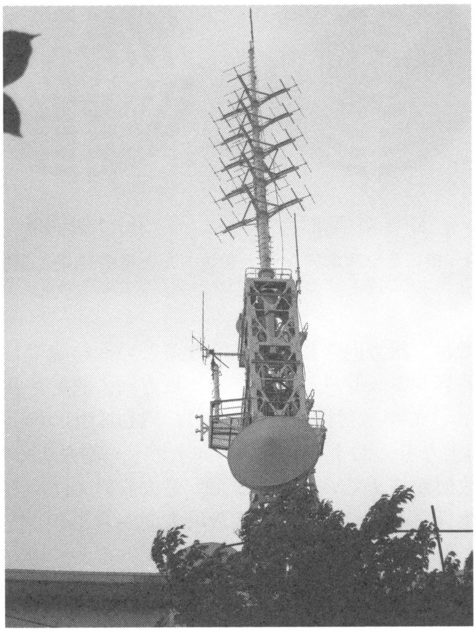
● レーダでよく使われるスタック・アンテナ

スタック・アンテナは，レーダ用途でよく使われます．例えば，船の上でゆっくり回っている棒状のアンテナは，**写真A**に示すような構造をしていて，非常にシャープな指向性をもっています(7)．これは，スロット1つ1つが小さなアンテナとして働くため，全体として横方向には鋭い放射パターンをもっているようになります．船用のレーダはアンテナを回しながら電波を放射して，その反射を見ているため，アンテナの放射ビームが狭いほど角度方向の分解能が向上します．

他の航空レーダや自動車の安全装備に使われているレーダでも，スタック・アンテナもしくはアレイ・アンテナという呼び名で複数のアンテナを並べたものが使われています．どのレーダでもビームを狭くしたり，アンテナ・ゲインを上げるために複数のアンテナを並べているのです．



(a) 道端で見かけたアマチュア無線家と思われるアンテナ．方向を変えるためのローテータがついている



(b) 北九州市の皿倉山山頂の放送局で見かけたアンテナ．縦方向のビームを絞るために5つのスタックで4方向に放射している

写真A　さまざまな場所で見かけるスタック・アンテナ

◆参考文献◆

(1) 角居 洋司，吉村 裕光；アンテナ・ハンドブック，1985年，CQ出版社.

(2) 石飛 徳昌；Sonnetによるアンテナ解析のガイドライン，2018年，ソネット技研.

(3) DL2KQ，DL1PBD；GAL-ANA professional antenna software，http://gal-ana.de/basicmm/en/，2025年10月19日アクセス.

(4) 日本アマチュア衛星通信協会；435 MHz用6エレメント八木の製作(改訂版)，https://www.jamsat.or.jp/features/cheapyagi/，2025年10月19日アクセス.

(5) 岩木 優介；第3章 衛星からの電波を受信する！ 437 MHz用アンテナの製作，トランジスタ技術，2024年9月号，CQ出版社.

(6) 岩木 優介；第19章　437 MHz受信用八木アンテナの設計&製作，トランジスタ技術SPECIAL，No.172，2025年，CQ出版社.

(7) 古野電気；レーダーの基礎知識，https://www.furuno.com/jp/technology/radar/basic/，2025年10月19日アクセス.

(8) 京都大学生存圏研究所；MUレーダーについて，https://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/radar.html，2025年10月19日アクセス.

● **世界最高性能の大気観測用大型レーダMUレーダ**

滋賀県甲賀市にはアジア域最大の大気観測用レーダ「MUレーダ」があります．このレーダは，上方向に向けて置かれた46.5 MHzのクロス八木アンテナ475本が直径103 mの円内に設置されており，大型の高性能アンテナとして機能します．

また，本文では詳しく説明しませんでしたが，それぞれのアンテナに給電するときの位相を変えることで，メイン・ビームの方向を高速に変えることができ，狙った方向の大気の運動や循環を観測できるという仕組みになっています．筆者も一度は見に行きたい施設の1つです．

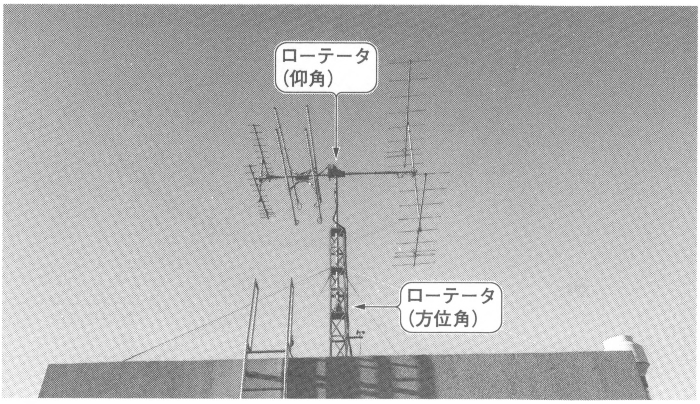
● **身の回りのスタック・アンテナ**

散歩したりドライブしながらアンテナをよく見ると，たまに同じアンテナが並べてあることに気づきます．アマチュア無線や放送用，衛星通信用，列車無線用などさまざまな用途で，スタック・アンテナが使われています．

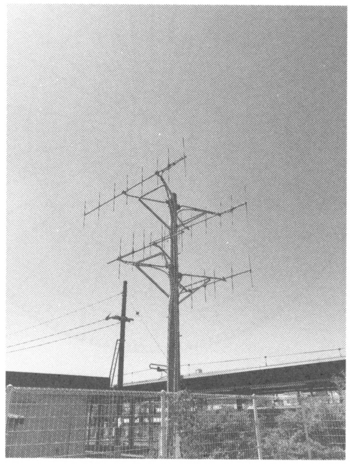
八木アンテナのエレメント長は，およそ半波長と決まっているので，間隔がエレメント長の何倍になっているかを見ると，どんな放射パターンになっているのか推定できます．

同じ形のアンテナが並んでいるところを見つけたら，何のためにこの感覚になっているのか想像を働かせてみるのも面白いかもしれません．

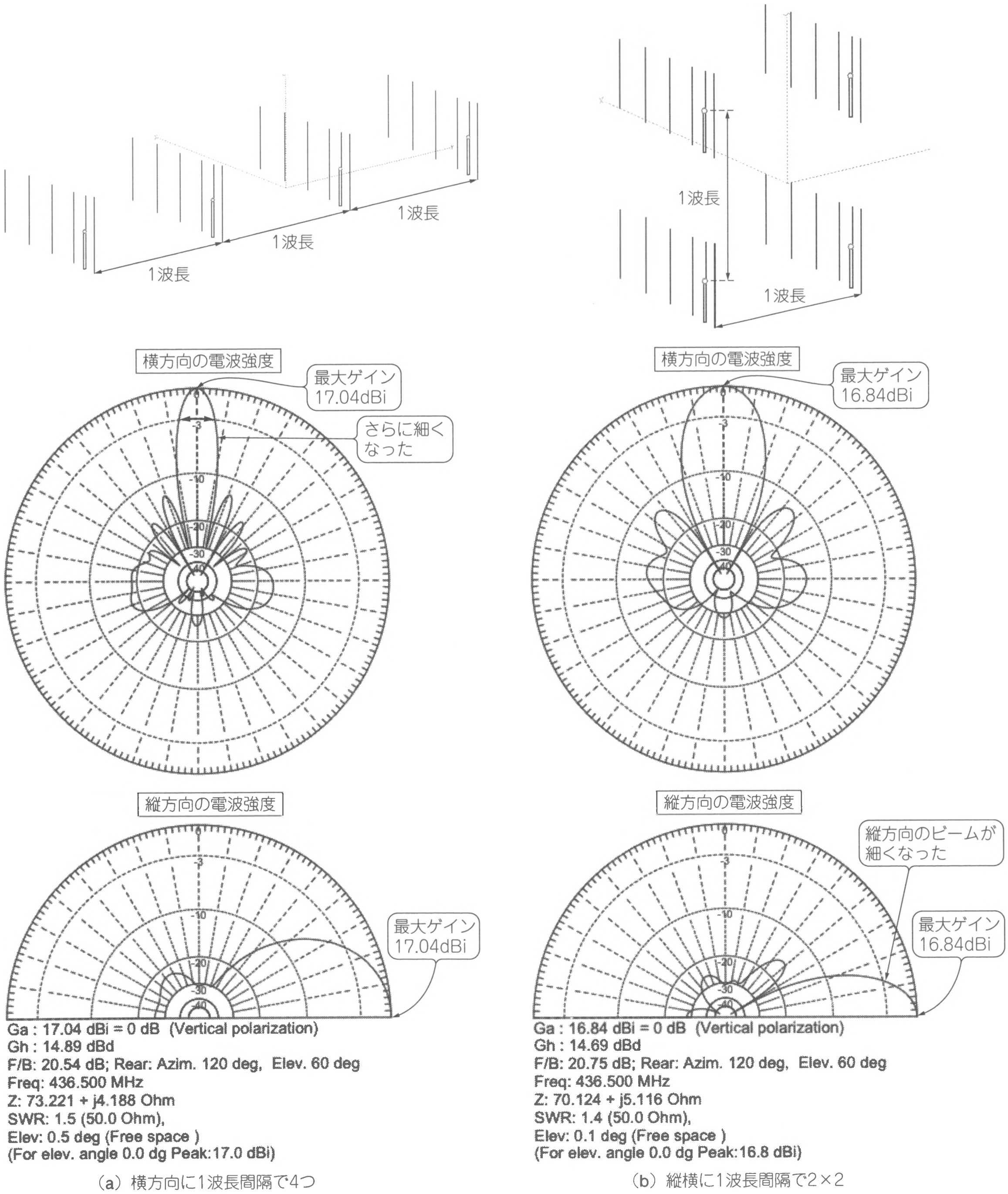
〈中山 大輔〉



(c) 九州工業大学の人工衛星運用アンテナ群．VHFからLバンドまでさまざまなアンテナがスタックされている．衛星にメイン・ビームを向けるためのローテータが備わっている



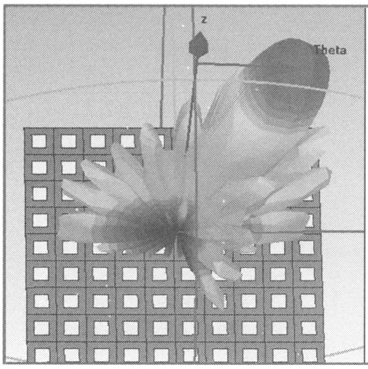
(d) 列車無線用と思われるアンテナ．上下で周波数帯が違う八木アンテナ．ここが中継局で，混信を避けるために違う周波数を使っているものと思われる



（a）横方向に1波長間隔で4つ　　（b）縦横に1波長間隔で2×2

図10　4つのアンテナのスタックの場合

横方向にさらにアンテナを並べると，横方向の放射パターンがさらに細くなっている．縦方向にも並べると，縦方向もビーム幅が細くなっている．どちらのスタックでも，単一のアンテナ・ゲイン11.03 dBiに対して電力4倍（+6 dB）程度の最大ゲインになっている



第3章　性能はUPするし回路部品選定もカンタン！

ビーム方向を自由に電子制御！フェーズド・アレイ・アンテナ基本数学

川口 正 Tadashi Kawaguchi

電子ビーム制御でメカ不要！超高性能アレイ・アンテナ

● 従来レーダ・アンテナの課題…メカでアンテナを回転させていた

図1は船舶などに搭載される，機械的に回転させて周囲物体の存在(位置，距離)を把握する従来型のレーダの例です．

船舶用レーダでは，マイクロ波ビームをアンテナの周囲360°に出しながら，数十kmの範囲で水面に浮かんでいる船などの反射波を受信して角度と位置を検出します．アンテナを機械的に回転させる構造のため，1周走査するだけでも時間がかかります．

● メカ不要！電子制御でビーム方向を制御する「フェーズド・アレイ・アンテナ」

図2(a)はイージス艦と周囲3D空間の物体をとらえるレーダのようすを簡単に示したものです．この図のイージス艦では8角形の大きな板状のものが艦船の4方向の側面(前面左右に2つ，後方左右に2つ)につけられていて，この板状のものがフェーズド・アレイ・アンテナです．

これは機械的に可変する部分がなく電子的にビーム方向を制御するため，アンテナ(艦船)位置を中心とした半径数百kmの半球状の範囲の空中を飛来する航空機やミサイルなどを高速に検知できます．

図2(b)のように，軍事用だけでなく人工衛星から地表の広い範囲をマイクロ波で高速に操作する用途にも用いられています．

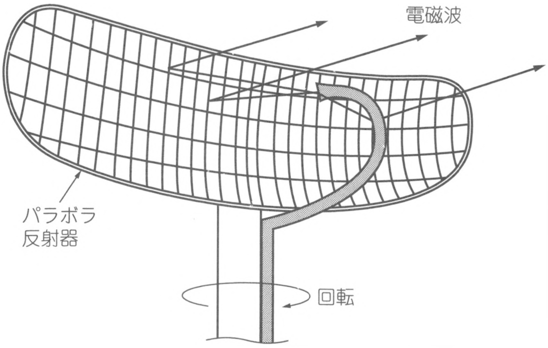
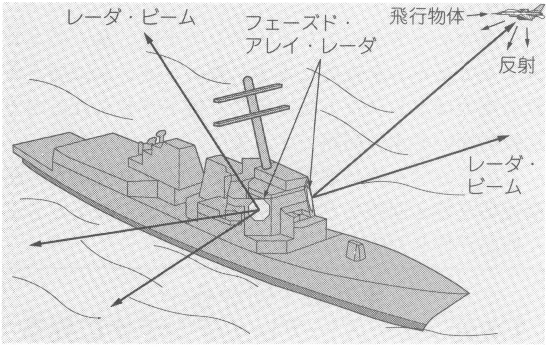
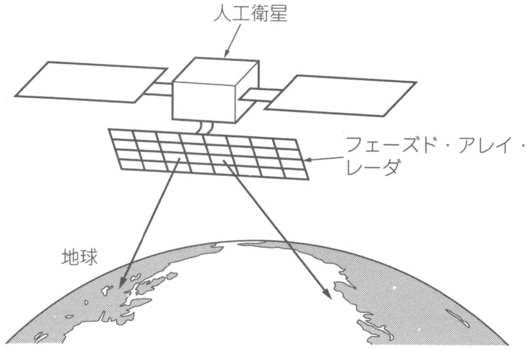


図1　アンテナを機械で回転させる従来方式は速度が不利！
アンテナを360°機械的に回転させ，周りの水面上にある物体からの反射波を検出．機械的回転のため高速化できない．反射器を放物面(パラボラ)にし，焦点部から電波を出す必要がある．近年は直線的な導波管の途中に複数の穴をあけるスロット・タイプが主流



(a) イージス艦…前後，左舷右舷にフェーズド・アレイ・アンテナが設けられている．水平面上の半球状範囲(半径数百km)をカバー



(b) 人工衛星…狙った範囲の地表の成分などを検出する

図2　電子的に向きを変えられる高性能フェーズド・アレイ・アンテナは実際にいろいろ使われている



（a）イージス艦用レーダ

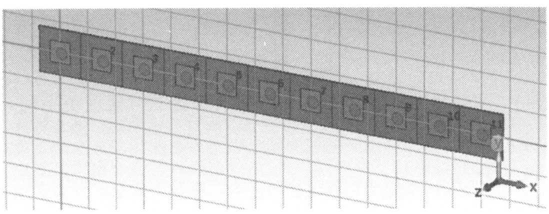
（b）各アレイに供給されるマイクロ波の位相を制御することで特定の方向に電磁波ビームを絞って出す

図3　2次元フェーズド・アレイ・アンテナの構造

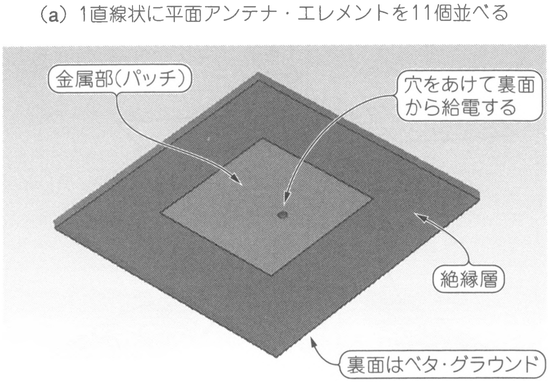
小さいアンテナだからこそのメリット

● 基本原理…小さいアンテナを並べて位相制御でビーム方向を制御する

多くのエレメントがアンテナ平面上に碁盤の目に並んで固定されています(**図3**)．電波を放出するアンテナ・エレメントを一定の間隔で並べた状態を「アレイ」ということからこのような形状のアンテナをアレイ・アンテナといいます．各エレメントに供給する高周波(マイクロ波)の位相(フェーズ)を一定の規則でずらせて空中に放出することで電波(ビーム)の方向を制御します．



（a）1直線状に平面アンテナ・エレメントを11個並べる



（b）パッチ・アンテナ…このモデルでは電力印加部裏面のベタ・グラウンド面の穴を介して裏面から電力が供給される

図4　パッチ・アンテナでつくる1次元のアレイ・アンテナ

ビーム方向を水平方向だけでなく高さ方向の制御も行う**図2**のような場合は，斜めに立てた2次元平面に複数のアンテナ・エレメントを並べて各エレメントに供給する高周波(マイクロ波)の位相を少しずつ制御することで実現します．

● 小さいアンテナなら回路や部品選定が超カンタンに！

並べた複数のエレメントに対して，同時に位相差をもったマイクロ波を加えることから，同じレーダ・ビーム強度を得るための各エレメントに加える電力は小さくてすむメリットもあります．対象物から反射して戻ってきた高周波(マイクロ波)を受信する場合は，各エレメントに設定される位相制御データを使用して電力出力経路と微弱信号受信経路を電子的に切り替えて送受信時とも同じ方向・経路で受信します．

従来の軍事用レーダでは，電波発射時の電力が数kWからMWと非常に大きなマイクロ波電力回路が必要で，またビーム発射直後に対象物からの反射で戻ってくる微弱な信号を受信するために低損失の高速経路切り替え部が必要という実現が難しい回路構造となっていました．

一方フェーズド・アレイ・アンテナは，多くのエレメントでビームを合成します．各エレメントに加えられる電力はエレメント数に応じて低下させられるので比較的扱いやすい回路ですみます．

このためマイクロ波電力回路やマイクロ波電力経路高速切り替え回路などがハイパワー対応でなくともよく回路が作りやすくなります．

まずは1列から…1次元フェーズド・アレイ・アンテナに見る位相＆ビーム制御の原理

● 構造

アンテナのエレメントを**図4**(**a**)のように直線状に

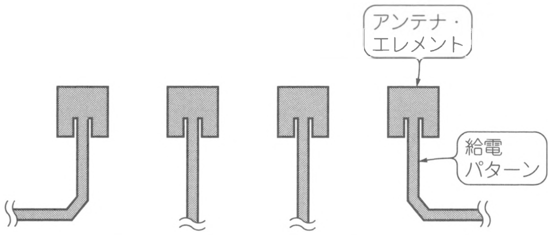


図5　基板表面から給電するタイプのアンテナ
アンテナと同じ面でパターンで，給電する構造．裏面からの給電では裏面に配線した同軸線から基板を貫通させるなど構造が複雑になるため，この形状が使われることが多い

並べる構造で，各エレメントに加わる周波数の位相を一定の間隔でシフトさせていくアンテナが1次元フェーズド・アレイ・アンテナです．

1つのアンテナのエレメントには，通常は**図4(b)**のような平面のものが使用されます．裏面は一面グランドです．このタイプの平面アンテナはパッチ・アンテナとも呼ばれます．

図5に，平面アンテナを基板上に並べたアレイ・アンテナの例を示します．この構造では，アンテナ・エレメントと同じ基板面に給電部を実装できるため，アンテナ裏面から同軸ケーブルなどで配線し，エレメント裏側から基板を貫通させて給電する構造と比べてシンプルになり，アレイ・アンテナを作りやすくなります．

図6は**図4**のアンテナ・エレメント1つに電圧を印加した場合の電磁界シミュレータによる解析結果です．アンテナと空間の電界強度分布を表示しています．**図7**はこのようなエレメントを距離dで並べた構造で，エレメント間の給電を$\Delta\phi$の位相差で加えるようすを図示したものです．

エレメント間に位相差を持たせて給電することでθ_0の方向に電波を向けられます．**図8**は3D電磁界解析

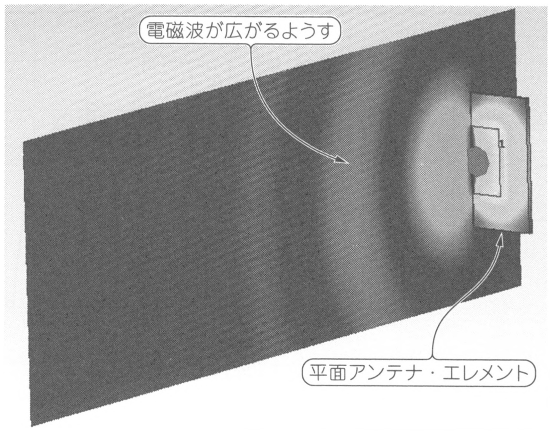


図6　1つのアレイ・エレメントから放出される電磁波のシミュレーション結果．CST Studio Suiteによる電界分布表示

シミュレータによる解析結果で，アレイ・アンテナからθ_0の方向に電磁波が向いているようすがわかります．

● **出力強度プロット**

アレイ数が10程度の1次元アレイ・アンテナでは，ビームの方向を制御するといっても，最も強い方向以外にもある程度の強さのビームが出ています．フェーズド・アレイ・アンテナでどの方向にどの程度の電波が出てるかは計算で求められます(後述)．

図9(a)は1次元フェーズド・アレイ・アンテナでエレメント数が8と16の場合についてビーム方向$\theta_0=0°$に設定したときにアレイ軸に直交する方向を0°として，±90°の範囲の角度方向での電波強度(アレイ・ファクタ)を計算式をもとにプロットしたものです．

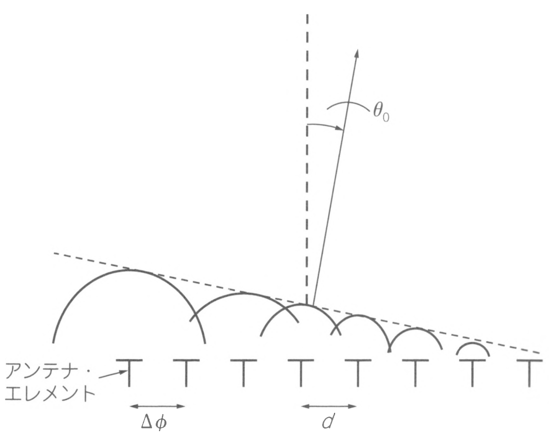


図7　1次元フェーズド・アレイ・アンテナの各エレメントに位相をずらせて印加した場合
直線状に並んだアンテナ・エレメントに位相差を持たせて周波数を加えるとθ_0方向に電磁波が進む．受信時には位相差を持たせて取り込むことでθ_0方向からの電磁波を強く受信できる

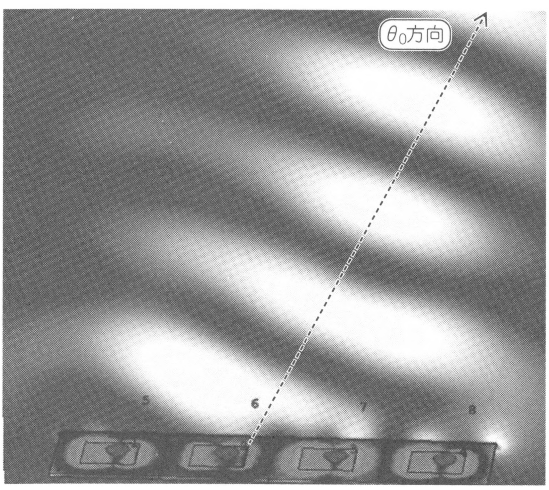
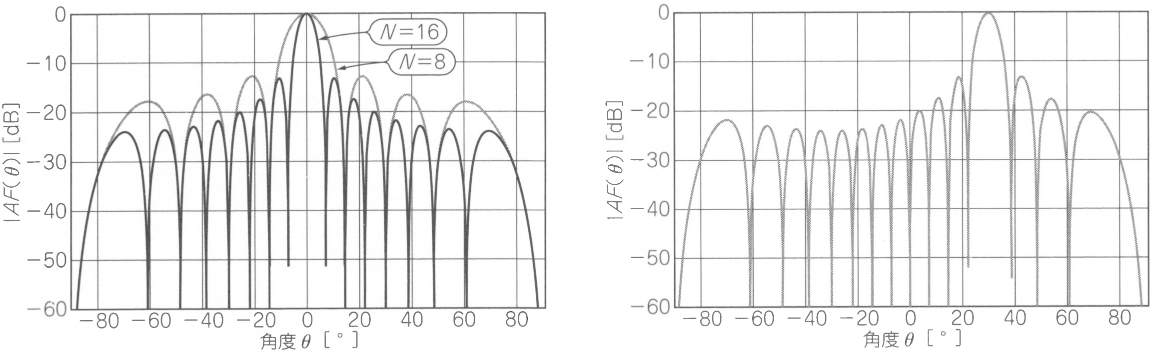


図8　1次元フェーズド・アレイ・アンテナから電波が出る様子
直線状に並んだエレメントに位相差を持たせて周波数を加えるとθ_0方向に電磁波が進む様子を電磁界シミュレータで描画．CST Studio Suite使用



（a）ビーム方向（θ_0）を0°としたとき　（b）ビーム方向（θ_0）を30°にしたとき（素子数N=16）

図9　アレイ・エレメント数によるアレイ・ファクタ（電波強度）の違い

図9(b)はエレメント数16のアレイ・アンテナでビームを30°に向けた時の電波強度（アレイ・ファクタ）をプロットしたものです．

図10はビームを30°に設定した場合のビーム形状を3D電磁界シミュレータで示したものです．1次元フェーズド・アレイ・アンテナでは，ビームといっても（半）円錐状に広がっていることがわかります．

● 1次元フェーズド・アレイ・アンテナのビーム方向の数学

アレイ・アンテナ・エレメントに印加する位相を少しずつずらしたとき，どの方向にどの強度で電波が放出されるかを式で表せます．**図11**はN個のアンテナ・エレメントを直線状に間隔dで並べたようすです．エレメント番号nはn=0，1，…，$N-1$とします．隣り合うエレメント間の進み位相をψとすると

$$\psi = -kd\sin\theta_0 \quad \cdots\cdots (1)$$

各エレメントに加える位相をϕnとすると

$$\phi n = \phi_0 + n\psi = \phi_0 - nkd\sin\theta_0 \quad \cdots\cdots (2)$$

1次元アレイ・アンテナからθ方向の電波強度（AF，アレイ・ファクタ）は式(3)で表されます．

$$AF(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(kd\sin\theta + \psi)} \quad \cdots\cdots (3)$$

$\theta = \theta_0$の方向で電波強度が最大となるためには

$$kd\sin\theta_0 + \psi = 2\pi m$$

m=0の場合を選んで

$$\psi = kd\sin\theta_0 \quad \cdots\cdots (4)$$

ビームがθ_0の方向に進んでいくためにエレメントに加える位相条件は式(4)で表されます．ここで，kは波数で$k = 2\pi/\lambda$，波がとなりの素子まで伝わる際に生じる幾何学的位相差で単位は[rad/m]です．これらの式で角度はラジアン[rad]で表されます．

θ_0の方向にビームを向けた時の任意の角度（θ）方向でのビーム電波の強さ（アレイ・ファクタ）は式(5)で表されます．

$$AF(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jnkd(\sin\theta - \sin\theta_0)} \quad \cdots\cdots (5)$$

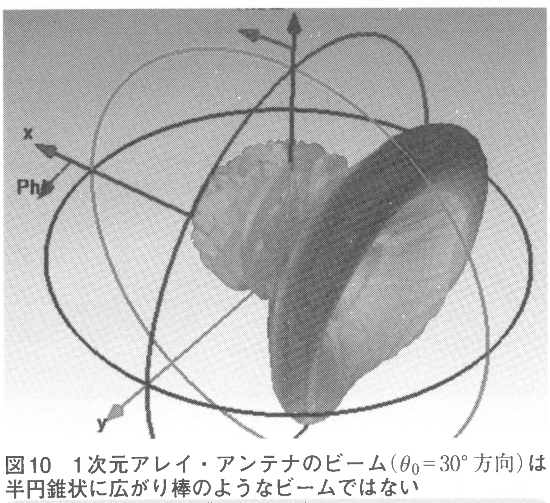


図10　1次元アレイ・アンテナのビーム（θ_0=30°方向）は半円錐状に広がり棒のようなビームではない
CST Studio Suite製品版によるシミュレーション

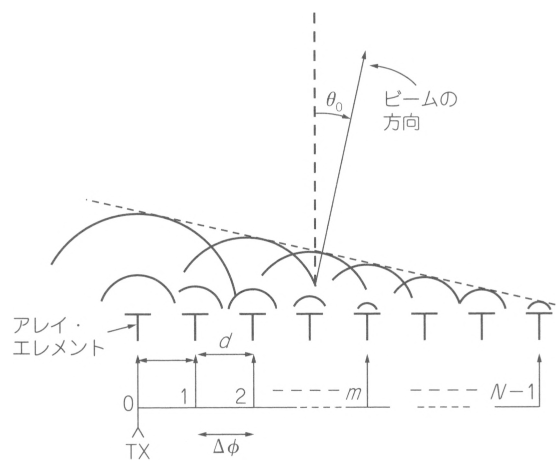


図11　1次元アレイ・エレメントのビーム方向と強度の数学
N：エレメント数，d：エレメント間隔，m：エレメントの番号，$\Delta\phi$：エレメント間の位相差，ψ：給電位相差（隣り合うエレメント間に加える周波数の位相差），k：波数=$2\pi/\lambda$，θ：θ_0方向に電磁波が進むときの各アレイに加わる印加周波数の位相

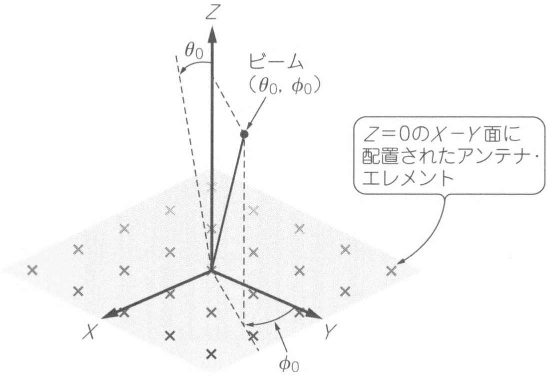


図12　ビームの方向を決めるθ_0(仰角)とϕ_0(方位角)

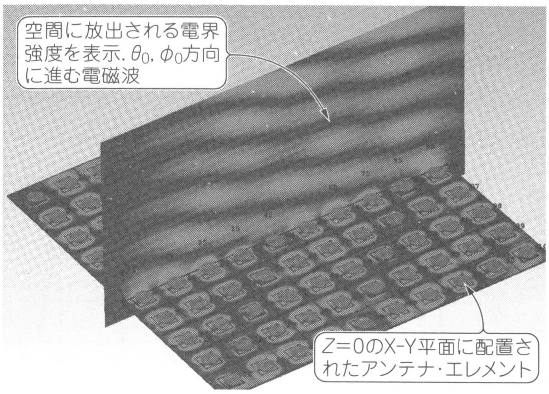


図13　10×10エレメントの2次元フェーズド・アレイ・アンテナ面の電界分布シミュレーション

平面に拡張！ 鋭いビームが作れる 2次元フェーズド・アレイ・アンテナ

人工衛星から地表をスキャンして戻ってくる信号を取り込んだり，イージス艦のアンテナのように3次元空間の任意の角度に棒状電磁波ビームを放出して対象物体からの反射信号を検出するには，平面上にアンテナ・エレメントを並べた2次元フェーズド・アレイ・アンテナが主に使用されます．

1次元フェーズド・アレイ・アンテナで説明した，各エレメントに位相差をもたせて電力を印加して方向を制御する方法を2次元に広げることで棒状のビームを実現します．

図12は2次元X-Y平面にアンテナ・エレメントを配置したようすとビームが向く方向を示します．X軸方向のエレメント間隔をdx，Y軸方向のエレメント間隔をdyとします．アンテナ平面に垂直の方向からの角度(仰角)をθ_0，X-Y平面の方向(方位角)を示す角度をϕ_0としています．

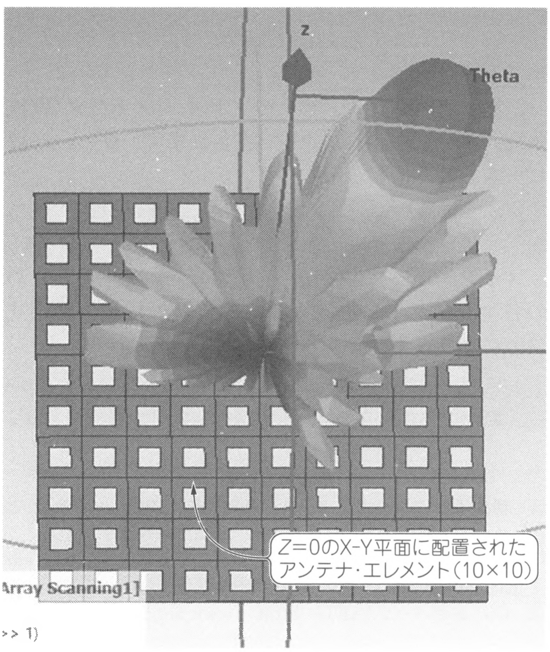


図14　10×10の2次元フェーズド・アレイ・アンテナのビームパターン3次元表示
下の平面はアレイ・アンテナ．位置関係の参考として表示

● 電磁界シミュレーション

図13は，2次元10×10のフェーズド・アレイ・アンテナとその近傍の電磁波のようすを3D電磁界シミュレーション(CST Studio Suite)した結果です．電磁波を電界で示しているのはX-Z面です．**図14**は，ビーム強度分布を3D空間で示した図です．**図15**はアレイ・アンテナから出る電波強度を水平方向の角度で円グラフで示した図です．

図16はアレイ数8×8でビーム方向を0°と30°にした場合の電波強度，**図17**はエレメント数を変えた時

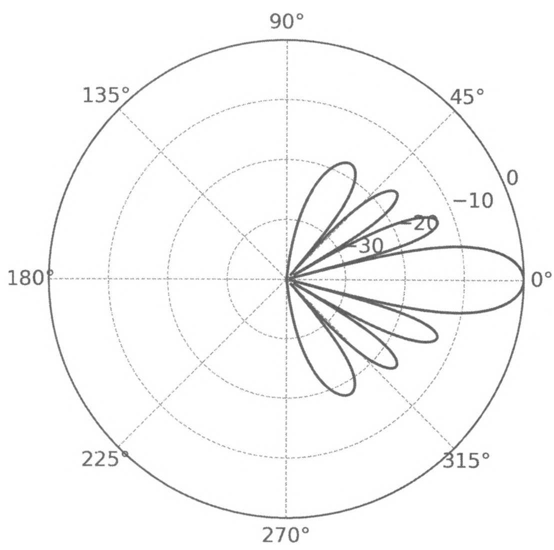


図15　円グラフで表示したビーム・パターン例
アンテナの水平角度方向の電磁波強度を示すグラフ

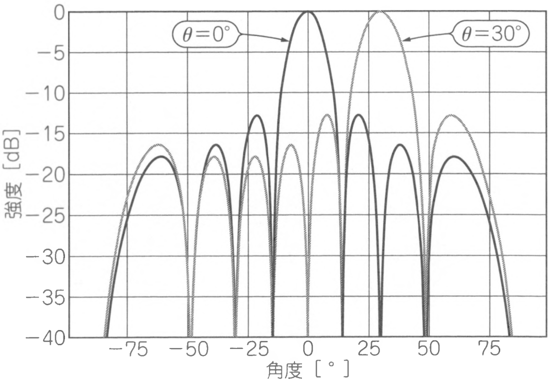


図16　φ固定でθ＝0°とθ＝30°の場合のビーム・パターン比較

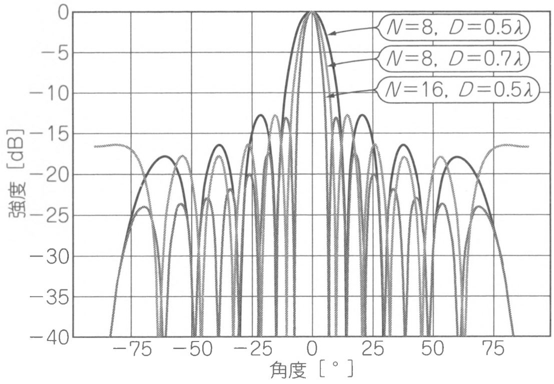


図17　エレメント数と素子間隔のちがいによるビーム・パターン比較…素子数増加により主ビーム(ローブ)が狭くなっている
d：エレメント間隔，λ：波長．

のビームの強さ・分布を示しています．

図17では±90°付近で強度が強くなっています．これはグレーティング・ローブと言われる，意図しない方向に強いビームが表れる現象です．実際の設計ではこのようなピークを避ける必要があります．

● 2次元フェーズド・アレイ・アンテナのビーム方向の数学

2次元フェーズド・アレイ・アンテナは1次元フェーズド・アレイ・アンテナを2次元面に拡張したものです．

ここではX方向のエレメント数がN_X，Y方向のエレメント数がN_Yの$N_X \times N_Y$構成の2次元フェーズド・アレイ・アンテナのビーム強さやビーム方向を設定する式を示します．

λは使用周波数の波長，m，nはX-Y面上に配置する各アンテナ・エレメントのインデックスでX方向がm，Y方向がnです．d_xとd_yはx方向とy方向のアンテナ・エレメント間隔です(**図18**)．

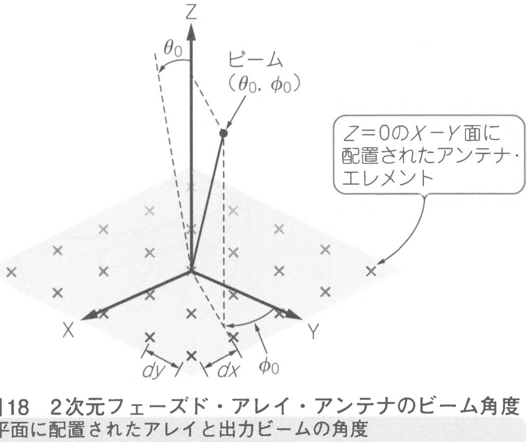


図18　2次元フェーズド・アレイ・アンテナのビーム角度
平面に配置されたアレイと出力ビームの角度
θ_0(仰角)およびϕ_0(方位角)

またr_x，r_y，r_zは要素の位置ベクトル成分で$s(\theta, \phi)$は指向単位ベクトルです．ϕ_0は基準位相です．

2次元アレイの各エレメントごとの位相条件は式(6)で示されます．

$$\phi_{m,n} = \phi_0 - \frac{2\pi\{d_x m\sin(\theta)\cos(\phi) + d_y n\sin(\phi)\sin(\theta)\}}{\lambda} \quad \cdots\cdots (6)$$

X方向位相差分$\Delta\phi_x$は式(7)，y方向位相差分$\Delta\phi_y$は式(8)で示されます．

$$\Delta\phi_x = -\frac{2\pi d_x \sin(\theta)\cos(\phi)}{\lambda} \quad \cdots\cdots (7)$$

$$\Delta\phi_y = -\frac{2\pi d_y \sin(\phi)\sin(\theta)}{\lambda} \quad \cdots\cdots (8)$$

2次元アレイ・アンテナのアレイ・ファクタ(電波強度，θとϕ方向)は式(9)で表されます．ψ_Xとψ_Yはビームを振る位相を示します．

$$AF(\theta, \phi) = \Sigma_m \Sigma_n \exp[\mathrm{jk}(md_X\sin\theta\cos\phi + nd_Y\sin\theta\sin\phi) + j(m\psi_X + n\psi_Y)] \cdots (9)$$

メイン・ローブ方向(θ_0，ϕ_0)にビームを向けるための各エレメントに加えられる周波数の位相条件は式(10)になります．

$$\psi_X = -kd_X\sin\theta_0\cos\phi_0,\quad \psi_Y = -kd_Y\sin\theta_0\sin\phi_0 \quad \cdots\cdots (10)$$

◆参考文献◆

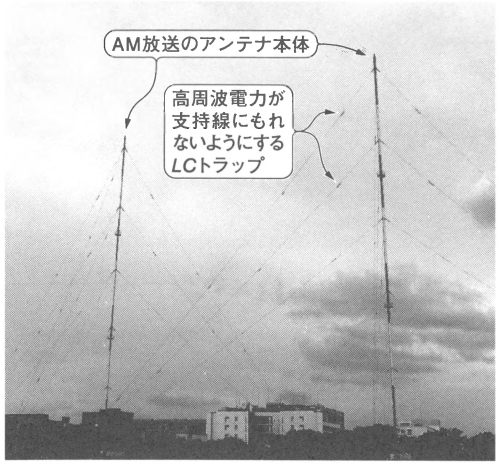
(1) 伊藤 信一；レーダシステムの基礎理論，2015，コロナ社．
(2) イージス艦：世界の艦船6月号，2023，海人社．
(3) https://www.zep.co.jp/before_after_pcb/web_seminar/sdr_paa/index.html
(4) CST説明ページ(AET)：https://www.aetjapan.com/cst/

コラム AM放送に見る実際のビーム形成アンテナ

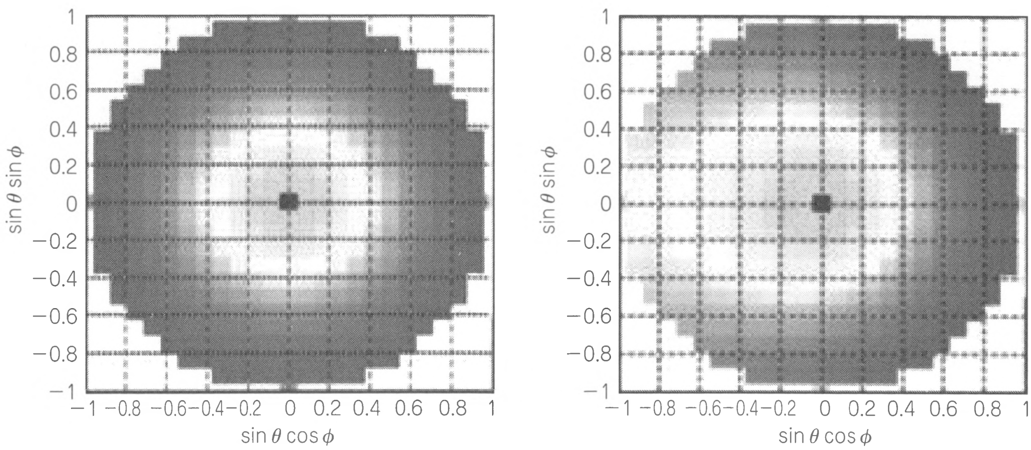
写真AはAM放送の送信アンテナの例です．数十mの高さのアンテナが直近に並んで立てられています．ロッド・アンテナのような単純形状のアンテナで，ある周波数の電磁波を加えると水平面で波長程度以上離れたところでは周囲360°方向に一様に電磁波を放出します[**図A(a)**]．

2本のアンテナに同じ周波数で異なった位相を加えると電波が放出される方向によって強度を変えられます．

図A(b)は90度の位相差を加えた場合で図で右側に強く電波が出ています．〈川口 正〉



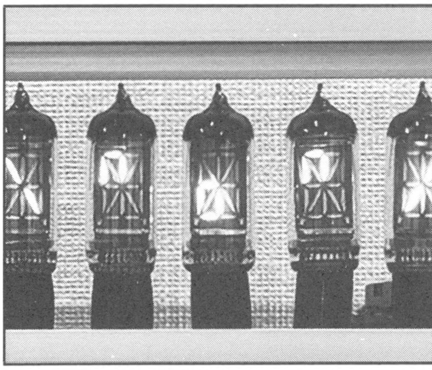
写真A 2本の隣り合って垂直に建てられているAMアンテナ
米軍ラジオ放送(AFR)のアンテナ．埼玉県和光市



(a) 1本のアンテナの遠方電界分布

(b) 2本のアンテナで位相差90°

図A 2本のアンテナに同じ周波数で異なった位相を加えると電波が放出される方向によって強度を変えられる
CST Studio Suite LE(Learning Edition評価版)による遠方界(水平面)表示．θとϕは，3次元空間でのビームの角度(仰角と方位角)



レトロがカッコイイ！ 蛍光表示管VFD時計回路

第3回　16セグメントの表現力！ 蛍光管ASCIIコード表示プログラム

足立 克 Masaru Adachi

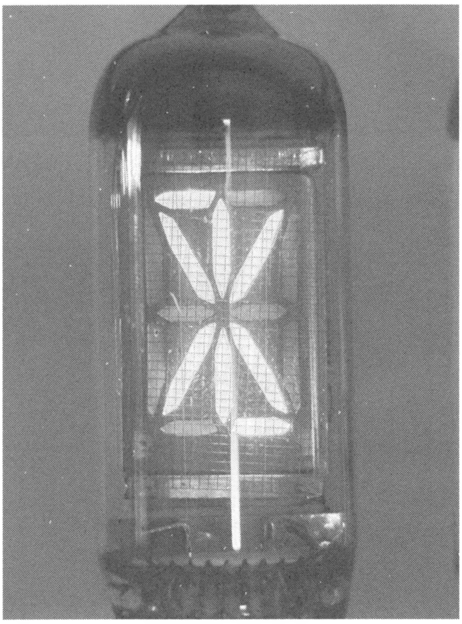


写真1　使用するオススメ蛍光管(VFD)IV-4は16セグメントもあるので%記号などの文字表示も可能！(ASCIIコード：37に対応)

VFDでは，文字や数字を表す複数のセグメントを単純に同時点灯すれば表示できます．せっかくArduinoを使うのですから，各セグメントを順次点灯させて複雑な表示方法になるよう工夫すれば，時計などでも，数字が変わる瞬間を見たくなるような面白い作品になります．

また，センサで測定した温度，湿度，気圧のデータを用いて，不快指数のような新たな数値データを算出することも容易です．さらに，気圧変化の移動平均を計算して最新データと比較することにより，晴雨計のような機能を追加することもできます．

このようにArduinoのプログラム(Arduinoではスケッチと呼ぶ)を工夫することによって，複雑な表示制御を行ったり，測定データから新たな数値データを算出したりして，作品の付加価値を高めることができます．ここでは，その詳しい方法について解説します．

なお，ここで紹介する内容は，VFDとシフトレジスタの連結接続が，本誌2025年10月号図7の回路のとおりであることが前提条件になります．

表1　ASCIIコード表(10進で0～31と127のコードは制御用で通常は表示されない)

10進	16進	文字	10進	16進	文字	10進	16進	文字	10進	16進	文字	10進	16進	文字	10進	16進	文字	10進	16進	文字	10進	16進	文字
0	00	NUL	16	10	DLE	32	20	SP	48	30	0	64	40	@	80	50	P	96	60	`	112	70	p
1	01	SOH	17	11	DC1	33	21	!	49	31	1	65	41	A	81	51	Q	97	61	a	113	71	q
2	02	STX	18	12	DC2	34	22	"	50	32	2	66	42	B	82	52	R	98	62	b	114	72	r
3	03	ETX	19	13	DC3	35	23	#	51	33	3	67	43	C	83	53	S	99	63	c	115	73	s
4	04	EOT	20	14	DC4	36	24	$	52	34	4	68	44	D	84	54	T	100	64	d	116	74	t
5	05	ENQ	21	15	NAK	37	25	%	53	35	5	69	45	E	85	55	U	101	65	e	117	75	u
6	06	ACK	22	16	SYN	38	26	&	54	36	6	70	46	F	86	56	V	102	66	f	118	76	v
7	07	BEL	23	17	ETB	39	27	'	55	37	7	71	47	G	87	57	W	103	67	g	119	77	w
8	08	BS	24	18	CAN	40	28	(	56	38	8	72	48	H	88	58	X	104	68	h	120	78	x
9	09	HT	25	19	EM	41	29	)	57	39	9	73	49	I	89	59	Y	105	69	i	121	79	y
10	0a	LF	26	1a	SUB	42	3a	*	58	3a	:	74	4a	J	90	5a	Z	106	6a	j	122	7a	z
11	0b	VT	27	1b	ESC	43	3b	+	59	3b	;	75	4b	K	91	5b	[	107	6b	k	123	7b	{
12	0c	FF	28	1c	FS	44	3d	,	60	3c	<	76	4c	L	92	5c	\	108	6c	l	124	7c	|
13	0d	CR	29	1d	GS	45	3d	-	61	3d	=	77	4d	M	93	5d	]	109	6d	m	125	7d	}
14	0e	SO	30	1e	RU	46	3e	.	62	3e	>	78	4e	N	94	5e	^	110	6e	n	126	7e	~
15	0f	SI	31	1f	US	47	3f	/	63	3f	?	79	4f	O	95	5f	_	111	6f	o	127	7f	DEL

リスト1　文字も表示できる16セグメントのVFDであるIV-4用のためにフォント・データを自作した

```
// VFDフォントデータ
uint16_t VFD_font[] = {
  (0b00000000 << 8) + 0b00000010,  // segment G2 0
  (0b00000000 << 8) + 0b00000100,  // segment L  1
  (0b00000000 << 8) + 0b00001000,  // segment K  2
  (0b00000000 << 8) + 0b00010000,  // segment J  3
  (0b00000000 << 8) + 0b00100000,  // segment G1 4
  (0b00000100 << 8) + 0b00000000,  // segment P  5
  (0b00001000 << 8) + 0b00000000,  // segment N  6
  (0b00010000 << 8) + 0b00000000,  // segment M  7
  (0b10000000 << 8) + 0b00000000,  // segment B  8
  (0b00000000 << 8) + 0b00000001,  // segment A2 9
  (0b00000000 << 8) + 0b01000000,  // segment A1 10
  (0b00000000 << 8) + 0b10000000,  // segment F  11
  (0b00000001 << 8) + 0b00000000,  // segment E  12
  (0b00000010 << 8) + 0b00000000,  // segment D1 13
  (0b00100000 << 8) + 0b00000000,  // segment D2 14
  (0b01000000 << 8) + 0b00000000,  // segment C  15
  0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, // 空き領域
  (0b00000000 << 8) + 0b00000000,  // スペース(全消灯) 32
  (0b00000000 << 8) + 0b11101000,  // ! 33  °
  (0b00000000 << 8) + 0b10001000,  // " 34
  (0b00101000 << 8) + 0b10111001,  // # 35  ℃
  (0b00000100 << 8) + 0b00110000,  // $ 36  →
  (0b00111100 << 8) + 0b01011100,  // % 37
  (0b00101110 << 8) + 0b00001101,  // & 38
  (0b00000000 << 8) + 0b00000100,  // ' 39
  (0b10000100 << 8) + 0b00000101,  // ( 40  ↗
  (0b01110000 << 8) + 0b00010000,  // ) 41  ↘
  (0b00011100 << 8) + 0b00111110,  // * 42
  (0b00001000 << 8) + 0b00101010,  // + 43
  (0b00000100 << 8) + 0b00000000,  // , 44
  (0b00000000 << 8) + 0b00100010,  // - 45
  (0b00000000 << 8) + 0b00000000,  // . 46  小数点
  (0b00000100 << 8) + 0b00000100,  // / 47
  (0b11100111 << 8) + 0b11000101,  // 0 48
  (0b11000000 << 8) + 0b00000100,  // 1 49
  (0b10100011 << 8) + 0b01100011,  // 2 50
  (0b11100010 << 8) + 0b01100011,  // 3 51
  (0b00001000 << 8) + 0b10101010,  // 4 52
  (0b01100010 << 8) + 0b11100011,  // 5 53
  (0b01100011 << 8) + 0b11100011,  // 6 54
  (0b00001000 << 8) + 0b01000101,  // 7 55
  (0b11100011 << 8) + 0b11100011,  // 8 56
  (0b11000000 << 8) + 0b11100011,  // 9 57
  (0b00100000 << 8) + 0b01000000,  // : 58
  (0b00000010 << 8) + 0b00000001,  // ; 59
  (0b00010000 << 8) + 0b00000100,  // < 60
  (0b00100010 << 8) + 0b01000001,  // = 61
  (0b00000100 << 8) + 0b00010000,  // > 62
  (0b10001000 << 8) + 0b01000011,  // ? 63
  (0b11111111 << 8) + 0b11111111,  // @ 全点灯 64
  (0b11000001 << 8) + 0b11100011,  // A
  (0b11101010 << 8) + 0b01001011,  // B
  (0b00100011 << 8) + 0b11000001,  // C
  (0b11101010 << 8) + 0b01001001,  // D
  (0b00100011 << 8) + 0b11100011,  // E
  (0b00000001 << 8) + 0b11100011,  // F 70
  (0b01100011 << 8) + 0b11000011,  // G
  (0b11000001 << 8) + 0b10100010,  // H
  (0b00101010 << 8) + 0b01001001,  // I
  (0b11100011 << 8) + 0b00000000,  // J
  (0b00010001 << 8) + 0b10100100,  // K
  (0b00100011 << 8) + 0b10000000,  // L
  (0b11000001 << 8) + 0b10010100,  // M
  (0b11010001 << 8) + 0b10010000,  // N
  (0b11100011 << 8) + 0b11000001,  // O
  (0b10000001 << 8) + 0b11100011,  // P 80
  (0b11110011 << 8) + 0b11000001,  // Q
  (0b00010001 << 8) + 0b11100101,  // R
  (0b01100010 << 8) + 0b11100011,  // S
  (0b00001000 << 8) + 0b01001001,  // T
  (0b11100011 << 8) + 0b10000000,  // U
  (0b00000101 << 8) + 0b10000100,  // V
  (0b11010101 << 8) + 0b10000000,  // W
  (0b00010100 << 8) + 0b00010100,  // X
  (0b00001000 << 8) + 0b00010100,  // Y
  (0b00100110 << 8) + 0b01000101,  // Z 90
  (0b00101000 << 8) + 0b00001001,  // [
  (0b00010000 << 8) + 0b00010000,  // ¥  //
  (0b00001010 << 8) + 0b01001000,  // ]
  (0b00000000 << 8) + 0b11001000,  // ^
  (0b00100010 << 8) + 0b00000000,  // _  95
  (0b00100010 << 8) + 0b00000000,  // 空き領域 96
  (0b00101011 << 8) + 0b00100000,  // a
  (0b00001011 << 8) + 0b10100000,  // b
  (0b00000011 << 8) + 0b00100000,  // c
  (0b11100011 << 8) + 0b00100010,  // d 100
  (0b00000111 << 8) + 0b00100000,  // e
  (0b00001000 << 8) + 0b00101011,  // f
  (0b00001010 << 8) + 0b11101000,  // g
  (0b00001001 << 8) + 0b10100000,  // h
  (0b00001000 << 8) + 0b01000000,  // i
  (0b00001011 << 8) + 0b00001000,  // j
  (0b00011000 << 8) + 0b00001100,  // k
  (0b00000001 << 8) + 0b10000000,  // l
  (0b01001001 << 8) + 0b00100010,  // m
  (0b00001001 << 8) + 0b00100000,  // n 110
  (0b00001011 << 8) + 0b00100000,  // o
  (0b10001000 << 8) + 0b00001011,  // p
  (0b00001000 << 8) + 0b11101000,  // q
  (0b00001000 << 8) + 0b00000010,  // r
  (0b00110000 << 8) + 0b00000010,  // s
  (0b00101000 << 8) + 0b00101010,  // t
  (0b00101011 << 8) + 0b00000000,  // u
  (0b00000101 << 8) + 0b00000000,  // v
  (0b01101011 << 8) + 0b00000000,  // w
  (0b00010100 << 8) + 0b00010100,  // x 120
  (0b00000100 << 8) + 0b00010100,  // y
  (0b00100110 << 8) + 0b01000101,  // z
  (0b00101000 << 8) + 0b00101001,  // {
  (0b11000000 << 8) + 0b00000000,  // |
  (0b00001010 << 8) + 0b01001010,  // }
  (0b01101000 << 8) + 0b11001000,  // ~
};
```

セグメント単体でも点灯できる
「!」→「°」
「#」→「℃」
「$」→「→」
「(」→「↗」
「)」→「↘」
「@」→「全点灯」

まずはフォント作りから

● ASCIIコードに準拠することが肝心！

今回使用する16セグメントVFDは，数字だけでなく，アルファベットや記号，カタカナなども表現できます．これらのうち，アルファベット（大文字と小文字），数字，一部の記号については，**表1**に示すASCIIコード表に準拠してフォントを作成します．

例えば，**写真1**に示す「%」記号のASCIIコードは37（10進数）です．フォント・データの配列を作成する際は，ASCIIコード表のとおり，配列の先頭を0番目として37番目に%記号のフォント・データを書きます．そうすることにより，`String`型の変数を使って，任意の文字列を表示できるようになります．

例えば，スケッチ上で**リスト1**に示すフォント・データを作成してある状態で，**リスト2**に示すスケッチを実行すると，227行目のダブル・クォーテーションで囲んだ文字列TORAが，**写真2**のように表示されます．

このスケッチでは，227行目で変数`VFDstr`を`String`型で`"TORA"`と宣言していますので，

リスト2　4つ並んだIV-4に4つの文字を表示するスケッチ(抜粋)

```
216 :  void setup() {
217 :    pinMode(DATA, OUTPUT);
218 :    pinMode(LATCH, OUTPUT);
219 :    pinMode(CLK, OUTPUT);
220 :    for (int i = 0; i < sizeof(PWM); i++) {
221 :      pinMode(PWM[i], OUTPUT);
222 :    }
223 :    for (int i = 0; i < 4; i++) {
224 :      Brightness(i, 255);  // VFDの明るさを設定
225 :    }
226 :
227 :    String VFDstr = "TORA";
228 :    // シフトレジスタに転送するデータの編集
229 :    for (int i = 0; i < 4; i++) {
230 :      char ASCII_code = VFDstr[i];
                             // i番目の文字のASCIIコードを取得
231 :      uint16_t fontdata =
            VFD_font[ASCII_code];
                   // i番目の文字の16ビット・フォントデータを取得
232 :      reg[i][1] = fontdata & 0xFF;
                // i番目の文字の上位シフトレジスタのデータをセット
233 :      reg[i][2] = fontdata >> 8;
                // i番目の文字の下位シフトレジスタのデータをセット
234 :      reg3[0] = 0;                  // 小数点は表示しない
235 :    }
236 :    // シフトレジスタへのデータ転送
237 :    digitalWrite(LATCH, LOW);
                                      // LATCH端子をLowにする
238 :    for (int i = 0; i < 4; i++) {
239 :      shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST,
            reg[3 - i][1]);
                   // i番目の文字の下位シフトレジスタへの転送
240 :      shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST,
            reg[3 - i][2]);
                   // i番目の文字の上位シフトレジスタへの転送
241 :      if ((i + 1) % 4 == 0) shiftOut(DATA,
            CLK, LSBFIRST, reg3[0]);
                    // 小数点&コンマ用シフトレジスタへの転送
242 :    }
243 :    digitalWrite(LATCH, HIGH);
                                     // LATCH端子をHighにする
244 :  }
```

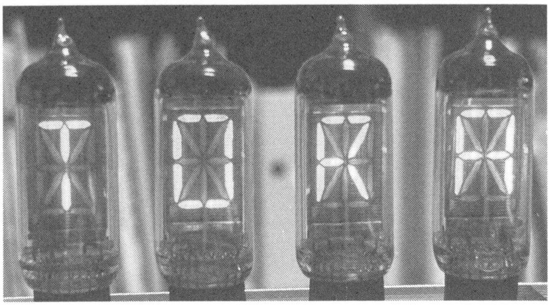


写真2　4つ連結したVFDに文字を表示してみる
リスト2のスケッチを実行

VFDstrは配列となり，T, O, R, AのASCIIコードが，

```
VFDstr[0]=84
VFDstr[1]=79
VFDstr[2]=82
VFDstr[3]=65
```

のように代入されます．これらを230行目でASCII_codeとして順番に取得します．

そしてASCII_codeに基づいて，あらかじめ作成しておいたフォント・データを取得します(231行目)．ここが重要なポイントで，フォント・データをASCIIコードに準拠して作成しておかないと，フォント・データを参照しても別な文字を取得してしまうことになります．

取得したフォント・データは16ビットなので，上位8ビットと下位8ビットの2つに分けてシフト・レジスタ(74HC595)に転送します．また，わかりやすくするため，とりあえずここでは小数点を表示しないことにし，小数点用シフト・レジスタのデータはゼロにしています(232～234行目)．

237～243行目でシフト・レジスタに転送します．

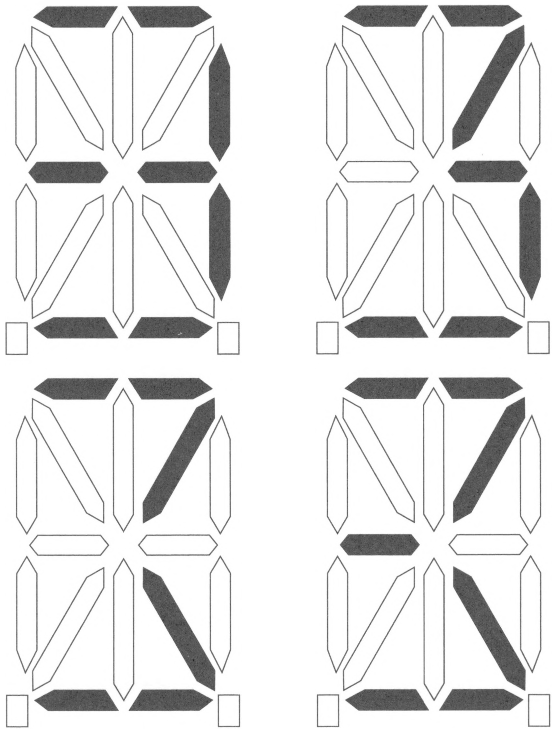


図1　同じ文字でもフォントの違いがありえる(数字の3)

● オリジナルのフォント表を作成する

16セグメントVFDは表現力が豊かなため，同じ文字でもセグメントの選び方によってイメージが異なります．例えば，**図1**に示すとおり数字の「3」は，L, B, C, G1, G2, Mといった VFDのセグメントの組み合わせを変えることによって文字のイメージが変わり，個性的なフォントを作ることができます．

そこで**表2**のようにフォント表を作成し，**図2**のセ

表2　まるでフォント・デザイナ…VFDのセグメント形状を見ながらフォントを作って表にまとめていく

VFDで表示できない文字は使わないことにして，代わりに自分の使いたい文字を入れている

ASCIIコード	文字	セグメント(上位8ビット)								セグメント(下位8ビット)							
		B	C	D2	M	N	P	D1	E	F	A1	G1	J	K	L	G2	A2
37	%	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0
38	&	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1
39	°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
40	↗	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
41	↘	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
42	*	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
43	+	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
44	,	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	−	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
46	.	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	/	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
48	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1
49	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
50	2	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1
51	3	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
52	4	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
53	5	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1

グメント配置図を見ながら，ASCIIコード，文字名，セグメント・データを，1文字ずつ記入していきます．そして，この表に基づいてスケッチにフォント・データを作成します．

このフォント表は，左半分のB～Eセグメントのデータが上位8ビット・データ，右半分のF～A2セグメントのデータが下位8ビット・データになります．このように上位と下位の8ビットに分けるのは，これらのフォント・データを上位と下位の2つのシフトレジスタ(74HC595)に送信するためです．

● フォント・データの参考例

リスト1に，16セグメントVFD(IV-4)用のフォント・データの一例を示します．このフォント・データには，**表1**に示したASCIIコード表に準拠した，アルファベットの大文字と小文字，数字，および記号が収録されています．カタカナは含まれていません．

たとえば「↗」の場合，**表2**のフォント表にしたがって**リスト1**の76行目で，

```
(0b10000100<<8)+00000101,
```

というように記述されます．

● ASCIIコード表にない記号は自作する

今回製作したVFD時計は，BME680を用いて温度，湿度，気圧などの気象データを表示します．これらのうち気温の単位である「℃」記号は，**表1**のASCIIコード表に収録されていませんので，自分で作成します．また，気圧の変化を測定して，晴雨計の機能をもたせるため，「↗」，「→」，「↘」の3つの矢印も作成します．

作成に際しては，**表2**のフォント・データ表と**図2**のセグメント配置を用います．これらの自作したフォントのASCIIコードについては，**表1**のASCIIコード表で不要と思われる記号のASCIIコードを割り当てます．例えば，「#」記号は今回使用するVFDのIV-4では物理的に表現できません．そこで，この記号のASCIIコード番号である35を「℃」記号に割り当てます．こうすることにより，例えば**リスト2**のスケッチで227行目を，

```
String VFDstr="-10#";
```

とすれば，4本のVFDに「−10℃」と表示されます．

また括弧記号については，「( )」，「[ ]」，「{ }」の3組がありますが，これらのうちASCIIコードが40と41の「(」と「)」の2つは同様にIV-4で表現できませんので，「(」記号を「↗」に，「)」記号を「↘」に

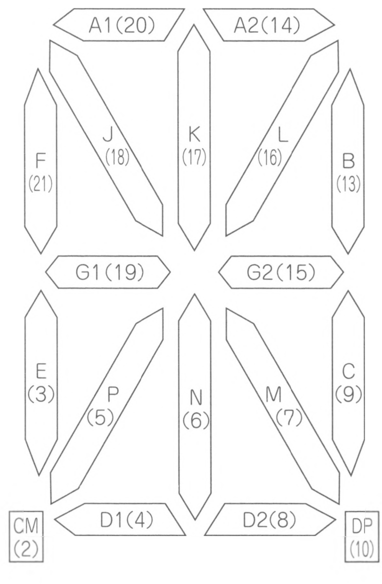


図2　16セグメントの配置

リスト3　セグメントを回転させながら表示するスケッチ

```
void setup() {
  pinMode(DATA, OUTPUT);
  pinMode(LATCH, OUTPUT);
  pinMode(CLK, OUTPUT);
  for (int i = 0; i < sizeof(PWM); i++) {
    pinMode(PWM[i], OUTPUT);
  }
  for (int i = 0; i < 4; i++) {
    Brightness(i, 255);  // VFDの明るさを設定
  }

  // セグメントを回転させながら文字を書き換える
  String VFDstr = "TORA";
  // シフトレジスタに転送するデータの編集
  for (int i = 0; i < 4; i++) {
    int sum = 0;
    int ASCII_code = VFDstr[i];
                    // i番目の文字のASCIIコードを取得
    uint16_t fontdata_B =
      VFD_font[ASCII_code];
          // i番目の文字の16ビットフォントデータを取得
    for (int j = 0; j < 17; j++) {
      int16_t fontdata_A = VFD_font[j];
          // j番目のセグメントのフォントデータを取得
      sum = sum + fontdata_A & fontdata_B;
          // 2つのフォントデータの論理積を累加
      reg[i][1] = (fontdata_A | sum) &
        0xFF;  // 上位シフトレジスタのデータをセット
      reg[i][2] = (fontdata_A | sum) >> 8;
                // 下位シフトレジスタのデータをセット
      reg3[0] = 0;          // 小数点は表示しない
      // シフトレジスタへのデータ転送
      digitalWrite(LATCH, LOW);
                       //LATCH端子をLOWにする
      for (int i = 0; i < 4; i++) {
        shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST,
          reg[3 - i][1]);
                  // 下位シフトレジスタへの転送
        shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST,
          reg[3 - i][2]);
                  // 上位シフトレジスタへの転送
        if ((i + 1) % 4 == 0) shiftOut
          (DATA, CLK, LSBFIRST, reg3[0]);
          // 小数点&コンマ用シフトレジスタへの転送
      }
      digitalWrite(LATCH, HIGH);
                      //LATCH端子をHIGHにする
      delay(20);
    }
  }
}
```

割り当てました．

このほかにも，今回製作したVFD時計では，「!」記号の代わりに，GPS測位データの緯度と経度を表すための「°」記号を，「$」記号を「→」に，「@」記号を「全点灯」に割り当てました．**リスト1**に示すフォント・データには，これらの変更がすべて含まれています．

● ASCIIコードの0～15を個々のセグメントに割り当て

ASCIIコードの0～31は文字や記号ではありませんので，この領域を利用して16個のセグメントを1つずつ単独で点灯できるようにデータを入力しました．具体的には，**リスト1**の51～66行目に示すとおり，ASCIIコードの0をG2セグメントとし，それ以降L→K→J→G1→P→N→M→B→A2→A1→F→E→D1→D2→Cの順にASCIIコードの15まで，各セグメントのデータを入力します．

こうすることによって，例えばfor文で添え字をASCIIコードにして0～15まで回せば，16個のセグメントを1つずつG2→L→K→…→Cの順にくるくると回転するように順次点灯させることができます．このように各セグメントを単独で順次点灯できるようにしておくと，文字や数字を表現する際に，動きのある面白い表示動作を実行できます．

● セグメントに動きを付けて面白く表示!

今回製作したVFD時計は，時計機能だけでなく，温湿度や気圧などの気象データのほかに，GPSによる測位データも表示します．これらの数値データや，“HUMIDITY”などの測定値名は，スケッチを工夫することによって，セグメントの点灯順序を操作して動きをもたせ，Arduinoならではの面白い表示の仕方をすることができます．

リスト3にその具体的なスケッチを示します．

G2→Cセグメントの16個のセグメントを個別に順次読み出して，セグメントがくるくると回転するように点灯させ，最終的に文字「K」を表示します．このときの途中計算の結果を**表3**に示します．

個別に順次読み出したセグメントのフォント・データをfontdata_Aとし，最終的に表示したい文字「K」のフォント・データをfontdata_Bとすれば，for文で添え字jを0～16で変化させた場合，両者の論理積の累計sumは**表3**で②のようになります．

このsumとfontdata_Aの論理和③を計算すれば，16個の全セグメントが1個ずつ順次点灯しては消灯していきますが，「K」を表示するのに必要なF，E，G1，L，Mの5つのセグメントだけは点灯し続け，最終的に文字「K」が組み立てられるように表示されます．**表3**で灰色のセルは，添え字jを変えた場合に点灯するセグメントを表しています．**表3**の③の欄は，文字「K」が組み立てられるように表示されるようすです．

for文で添え字jを1つ増やすたびに，この論理和データをシフトレジスタに転送すれば，VFDの全セグメントをくるくると回転するように順次点灯させ，最終的に表示したい文字のセグメントだけを光り続けるようにすることができます．

表3　セグメントを回転させながら表示する途中計算の結果

計算式	j	セグメント																備　考
		G2	L	K	J	G1	P	N	M	B	A2	A1	F	E	D1	D2	C	
① fontdata_A	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j=0~15 G2～Cセグメントを順次読み出し
	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j=16　全消灯
fontdata_B	/	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	大文字の「K」
② sum=sum+ fontdata_A & fontdata_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j=0~16 fontdata_Aと fontdata_Bの 論理積を累加
	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
	12	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	
	13	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	
	14	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	
	15	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	
	16	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	
③ fontdata_A | sum	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	j=0~15 sumと fontadata_Aの 論理和 G2～Cセグメントが順次点灯し「K」が組み立てられていく
	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	
	10	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	
	11	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
	12	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	
	13	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	
	14	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	
	15	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	
	16	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	最終表示「K」

リスト4　セグメントを回転させながら表示する関数(小数点表示対応)

```
void RotateChar2(String VFDstr) {
  // 文字列の前後にスペースを付加して中央に編集しなおす
  int space = (16 - VFDstr.length()) / 2;
  for (int i = 0; i < space + (16 - VFDstr.length()) % 2; i++) {
    VFDstr = " " + VFDstr;
    VFDstr = VFDstr + " ";
  }
  for (int i = 0; i < 16; i++) {
    int sum = 0;
    if (VFDstr[i] != VFDstr_prev[i]) {  // 前回表示した文字と異なる文字だけ書き換える
      int b = VFDstr[i];                // 表示する文字のASCIIコードを取得
      uint16_t B = VFD_font[b];         // 表示する文字の16ビット・フォントデータを取得
      // 小数点の追加と削除
      if (b == 46) {  // 文字が小数点だったら
        if (i < 4) reg3[0] |= (0b00001000 >> i);                               // VFD#0～VFD#3の小数点を追加
        if ((i > 3) && (i < 8)) reg3[1] |= (0b00001000 >> (i - 4));  // VFD#4～VFD#7の小数点を追加
        if ((i > 7) && (i < 12)) reg3[2] |= (0b00001000 >> (i - 8));
                                                                      // VFD#8～VFD#11の小数点を追加
        if ((i > 11) && (i < 16)) reg3[3] |= (0b00001000 >> (i - 12));
                                                                      // VFD#12～VFD#15の小数点を追加
      } else {          // 文字が小数点以外だったら
        if ((i < 4) && ((reg3[0] & (0b00001000 >> i)) >> (3 - i)) == 1) reg3[0]
          = reg3[0] - (0b00001000 >> i);  // VFD#0～VFD#3の小数点を削除
        if ((i > 3) && (i < 8) && (((reg3[1] & (0b00001000 >> (i - 4))) >> (7 - i))
          == 1)) reg3[1] = reg3[1] - (0b00001000 >> (i - 4));  // VFD#4～VFD#7の小数点を削除
        if ((i > 7) && (i < 12) && (((reg3[2] & (0b00001000 >> (i - 8))) >> (11 - i))
          == 1)) reg3[2] = reg3[2] - (0b00001000 >> (i - 8));  // VFD#8～VFD#11の小数点を削除
        if ((i > 11) && (i < 16) && (((reg3[3] & (0b00001000 >> (i - 12))) >> (15 - i))
          == 1)) reg3[3] = reg3[3] - (0b00001000 >> (i - 12));  // VFD#12～VFD#15の小数点を削除
      }
      for (int j = 0; j < 17; j++) {
        int16_t A = VFD_font[j];  // j番目のセグメントのフォントデータを取得
        sum = sum + A & B;
        reg[i][1] = (A | sum) & 0xFF;
        reg[i][2] = (A | sum) >> 8;
        // シフトレジスタへのデータ転送
        digitalWrite(LATCH, LOW);
        for (int i = 0; i < 16; i++) {
          shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST, reg[15 - i][1]);  // 下位シフトレジスタへの転送
          shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST, reg[15 - i][2]);  // 上位シフトレジスタへの転送
          if ((i + 1) % 4 == 0) shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST, reg3[3 - ((i + 1) / 4 - 1)]);
                                                          // 小数点&コンマ用シフトレジスタへの転送
        }
        digitalWrite(LATCH, HIGH);
        delay(7);
      }
    }
    VFDstr_prev[i] = VFDstr[i];
  }
}
```

リスト3に示したスケッチは，理解しやすくするため，小数点を表示しないようになっていますが，実際は表示内容に応じて小数点を点灯または消灯する必要があります．**リスト4**に示すスケッチは，小数点を表示できるようにしたもので，使いやすくするためvoid関数にしてあります．

表4　気温と湿度のデータから計算された不快指数での体感

不快指数	体　感
～ 55	寒い
55 ～ 60	肌寒い
60 ～ 65	何も感じない
65 ～ 70	快い
70 ～ 75	暑くない
75 ～ 80	やや暑い
80 ～ 85	暑くて汗が出る
85 ～	暑くてたまらない

測定した気象データから新たな情報を得る

● 不快指数の計算

今回製作したVFD時計は，BME680を用いて気温，湿度，気圧などの気象データを測定して表示します．このため，Arduinoを用いて気温と湿度のデータから不快指数(DI；Discomfort Index)を計算することができます．計算式は次式のとおりで，Tは気温，Hは湿度です．

$$DI = 0.81T + 0.01H(0.99T - 14.3) + 46.3$$

リスト5　気圧と気圧変化を表示するスケッチ(抜粋)

```
291 : void loop() {
292 :   if (mySerial.available()) {
293 :     char data = mySerial.read();
294 :     if (data != '¥n') {
295 :       GPS_str[cnt++] = data;
                          // GPSモジュールからデータを読み込む
296 :     } else {
297 :       flag = true;
298 :       GPS_str[cnt] = '¥0';
299 :     }
300 :     if (flag == true) {
301 :       flag = false;
302 :       if (strncmp(GPS_str, "$GPGGA", 6)
              == 0) {  // GPGGAセンテンスを検出
303 :         m = 10 * (GPS_str[9] - 0x30)
                + GPS_str[10] - 0x30;   // 分を数値化
304 :         s = 10 * (GPS_str[11] - 0x30)
                + GPS_str[12] - 0x30;   // 秒を数値化
305 :       }
306 :       BME680();
              // BME680から温度・湿度・気圧のデータを取得
307 :       if (pres > pres_avg + 0.2)
              SetChar(String(pres_int) + "(");
308 :       if (pres < pres_avg - 0.2)
              SetChar(String(pres_int) + ")");
309 :       if ((pres <= pres_avg + 0.2)
              && (pres >= pres_avg - 0.2))
              SetChar(String(pres_int) + "$");
310 :       cnt = 0;
311 :     }
312 :   }
313 : }
```

また，不快指数と体感の関係を**表4**に示します．例えば，計算した不快指数に応じて，「○」「△」「×」などの記号や，顔文字などを表示してみると面白いかもしれません．このように，Arduinoを用いるとアイデア次第で作品の付加価値を高めることができます．

● 晴雨計機能の追加

BME680で測定した気圧データを適切に処理することにより，天気の変化を予測することができます．具体的には，気圧を10分ごとに測定し，1時間ぶんに相当する過去6回の測定データで移動平均を計算します．この移動平均値と最新の測定データを比較し，両者の差が±0.2 hPaの範囲内であれば気圧変化がないものとして「→」を表示します．また移動平均値よりも最新のデータが0.2 hPa以上高い場合は，気圧上昇として「↗」を，0.2 hPa以上低い場合は気圧低下として「↘」を表示します．

リスト5にスケッチを示します．`loop()`内では次のことを行います．

① GPSモジュールから文字列データを読み込みます(292～299行目)．

② 読み込んだ文字列の先頭が“$GPGGA”の6文字であることを確認し，その文字列がGPGGAセンテンスであることを検知します(302行目)．

③ 文字列のなかから分データと秒データを読み込みます(303～304行目)．

④ BME680から温度，湿度，気圧，気圧の移動平均値，CO_2レベルのデータを読み込みます(306行目)．

⑤ 気圧の過去6回の移動平均値と最新の値を比較し，後者が前者より0.2 hPa以上高い場合は「↗」，0.2 hPa以上低い場合は「↘」，両者の差が±0.2 hPa以内の場合は「→」を表示します(307～309行目)．

このスケッチを実行すると，VFDには**写真3**に示すように表示されます．

日本列島を移動性高気圧が通過する春と秋には，気圧変化から天気の移ろいをある程度予測できます．**図3**に，この機能を用いて2025年4月9日～11日に観測した気圧変化と天気の関係を示します．

気圧変化が横ばいの状態のときは曇りになり，ある程度低下した曇りの状態から急激に下がったときは雨になります．また，雨の状態から気圧が上昇すると曇りへと回復しているようすが伺えます．必ずしも正確に天気を予測できるわけではありませんが，目安にはなりますので，暮らしに役立てることができます．

リスト6に，BME680から気象データを取得する`BME680()`関数と，移動平均を計算する`MovingAverage()`関数を示します．GPSモジュールから取得した分データを10で割った際のあまり(`m % 10`)と，秒データ(`s`)がともにゼロになるのは10分おきになりますので，`BME680()`関数では，この条件を満たした時刻に`MovingAverage()`関数で移動平均を計算します．

リスト7に示すのは，16文字以内の任意の文字列を表示する`SetChar()`関数です．この関数に渡された文字列データ`VFDstr`が16文字より少ない場合は，604～609行目で文字列の前後に適当な数のスペースを付加し，16個のVFD列の中央に表示されるように編集します．

編集された文字列から，611～615行目でASCIIコ

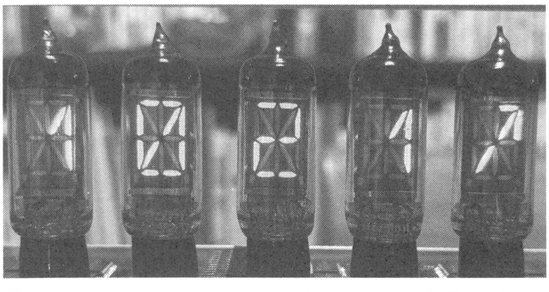


写真3　計測された気圧を4桁表示して晴雨計の機能(矢印)**もつけた**

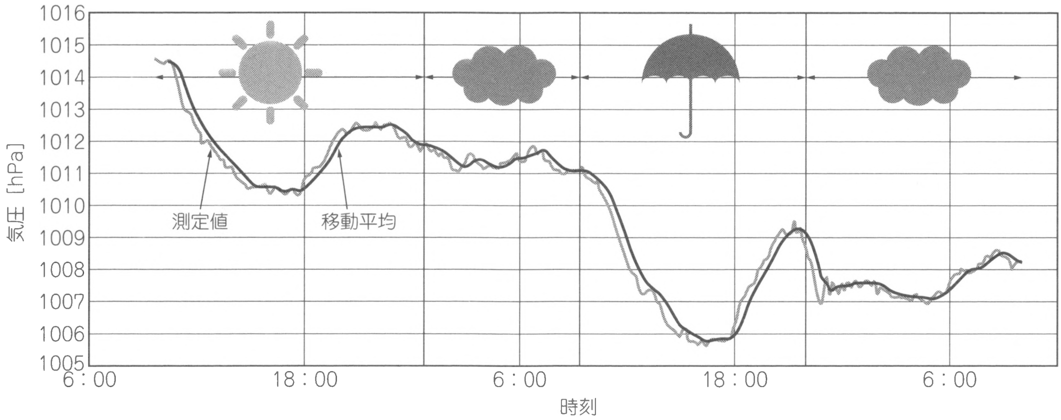


図3　気圧変化と天気の関係

ードを取得して，16セグメント用のレジスタにフォント・データを書き込みます．もしも小数点のASCIIコード(46)だった場合は，617～622行目で小数点用のレジスタにデータを書き込みます．

リスト6　BME680から気象データを取得するBME680()関数と移動平均を計算するMovingAverage()関数

```
// BME680から温度・湿度・気圧のデータを取得する関数
void BME680() {
  bme.performReading();
  pres = (float)bme.pressure / 100.0;          // 気圧データを実際の値に計算
  temp = (float)bme.temperature;               // 温度データを実際の値に計算
  humi = (float)bme.humidity;                  // 湿度データを実際の値に計算
  CO2 = (float)bme.gas_resistance / 1000.0;    // CO2データを実際の値に計算
  float pres1 = 1.0 - 0.0065 * 172.0 / (temp + 0.0065 * 172.0 + 273.15); // 気圧の海面補正
  pres = pres * pow(pres1, -5.257);            // 気圧の海面補正
  pres_int = round(pres);                      // 気圧を四捨五入して整数にする
  if ((m % 10 == 0) && (s == 0)) pres_avg = MovingAverage(pres);
                                               // 10分ごとに気圧データの移動平均を更新
}

// 移動平均を計算する関数
float MovingAverage(float data) {
  count++;
  if (count > 5) count = 0;
  data_sum[count] = data;
  float result = 0.0;
  for (int i = 0; i < 6; i++) result += data_sum[i];  // 6つのデータを累加する
  result = result / 6.0;                               // 6回の平均を計算する
  return result;
}
```

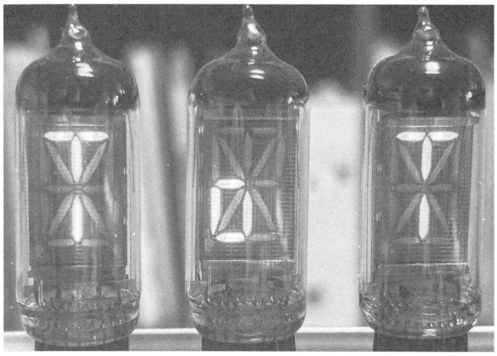
コラム　まさかのレトロ蛍光管で顔文字！今こそ広がる電子回路の可能性

VFDが盛んに使われていた1970年代には，Arduinoのようなマイコン環境がなく，Z80 CPUなどの部品を集めてボードを製作し，アセンブリ言語でプログラミングしなければなりませんでした．このためマイコンを使った制御を行えるのは一部の専門技術者に限られました．面白いアイデアがあってもそれを実現するための技術的なハードルが非常に高く，広く一般の趣味層がVFDを用いて面白い作品を作るのは困難でした．

2000年頃になると携帯電話が普及しはじめ，ポケベルに始まった絵文字文化が発展してさまざまな顔文字が使われるようになりました．また，アニメでニキシー管が使われたことにより，昭和時代の表示デバイスが再び脚光を浴びるきっかけにもなりました．

そして，Arduinoが登場したことにより，こうした若者文化が昭和の表示デバイスと融合し，かつてVFDを開発した技術者たちが想像だにしなかった新たな作品が生まれるようになったのです．

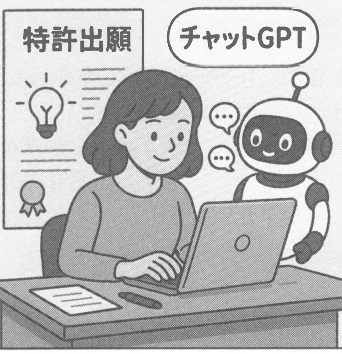
一例ですが，VFDによる顔文字表示の例を**写真A**に示します．　**〈足立 克〉**



写真A　蛍光管(VFD)による顔文字

リスト7　任意の文字列を表示するSetChar()関数

```
// 文字列を表示する関数
void SetChar(String VFDstr) {
  // 文字列の前後にスペースを付加して中央に編集しなおす
  int space = (16 - VFDstr.length()) / 2;
  for (int i = 0; i < space + (16 - VFDstr.length()) % 2; i++) {
    VFDstr = " " + VFDstr;
    VFDstr = VFDstr + " ";
  }
  // 文字レジスタと小数点レジスタのデータ設定
  for (int i = 0; i < VFDstr.length(); i++) {
    uint8_t a1 = VFDstr[i];                  // VFDstrのASCIIデータ取得
    uint16_t fontdata1 = VFD_font[a1];       // VFDstrのフォントデータ取得
    reg[i][1] = (fontdata1 & 0xFF);          // VFDstrの下位ビット・レジスタの編集
    reg[i][2] = (fontdata1 >> 8);            // VFDstrの上位ビット・レジスタの編集
    // 小数点の付加
    if (a1 == 46) {  // VFDstrが小数点だったら
      if (i < 4) reg3[0] += 0b00001000 >> i;
      if ((i > 3) && (i < 8)) reg3[1] += 0b00001000 >> (i - 4);
      if ((i > 7) && (i < 12)) reg3[2] += 0b00001000 >> (i - 8);
      if ((i > 11) && (i < 16)) reg3[3] += 0b00001000 >> (i - 12);
    }
    VFDstr_prev[i] = VFDstr[i];
  }
  // 文字レジスタと小数点レジスタにデータ転送
  digitalWrite(LATCH, LOW);
  for (int i = 0; i < 16; i++) {
    shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST, reg[15 - i][1]);       // 下位シフトレジスタへの転送
    shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST, reg[15 - i][2]);       // 上位シフトレジスタへの転送
    if ((i + 1) % 4 == 0) shiftOut(DATA, CLK, LSBFIRST, reg3[3 - ((i + 1) / 4 - 1)]);
                                                  // 小数点＆コンマ用シフトレジスタへの転送
  }
  digitalWrite(LATCH, HIGH);
  // 小数点レジスタのクリア
  for (int i = 0; i < 4; i++) {
    reg3[i] = 0;
  }
}
```



お伴としてのChatGPT

生成AIアシスト 特許の調査＆出願

第4回　努力と根性はもう古い？ 生成AIを活用した効率的な学習について

深川 栄生　Shigeo Fukagawa

これまで専門知識を身につけるには，分厚い専門書を読んだり，専門家に直接話を聞いたりするなど，時間も手間もかかるものでした．しかし，生成AIの登場により，その学び方は大きく変わろうとしています．

生成AIは，まるでそばに先生がいるかのように，専門的な内容をわかりやすく説明してくれたり，自分の考えを整理する手助けをしてくれたりします．さらに，動画やファイルの中から必要な情報を見つけ出すこともできます．

今回は，生成AIを単なる文章作成ツールではなく，学びのパートナとして活用する方法を紹介します．

ひたすら思考をAIに打ち返す「壁打ち」学習

● 時間と回数を気にせずプロンプトを打つべし

壁打ちとは，本来テニスの練習方法で，1人で壁に向かってボールを打ち返すことを意味します．この考え方を学習に応用したのが，生成AIとの壁打ちです．生成AIを話し相手やアイデアの受け止め役として，自分の考えや疑問を投げかけることで，考えを深めていく方法です．例えば，専門用語の意味を尋ねたり，課題の解決策について相談したりすることで，自分だけでは気づけなかった視点や新たなアイデアを得ることができます．

また，人には聞きにくい初歩的な疑問や，少し変わったアイデアでも，AIは否定することなく丁寧に対応してくれます．こうしたやり取りを繰り返すことで，理解が深まり，自分の考えを整理することができます．

生成AIは，24時間いつでもあなたのペースに合わせて応じてくれる，理想的な壁打ち相手です．

最も簡単な壁打ち方法は，次の3つのステップを組み合わせるだけです．その結果，理解が深まり，考えを整理できます．

● ステップ1　初歩的な質問をする

とにかく，わからない専門用語や気になるキーワードについて質問します．

▶プロンプトの例：「特許とは何ですか．」

ChatGPTの回答(ステップ1)

特許とは，新しい発明をした人が，その発明を一定期間独占的に利用できる権利です．発明者は国に特許を出願し，審査を受けて認められると，出願から20年間の独占権を得られます．出願内容は原則として1年6か月後に公開され，誰でも閲覧できます．公開することで技術の共有が進み，産業の発展に貢献しますが，その代わりに発明者は一定期間利益を独占できるのです．他人の無断使用を防ぎ，正当な利益を守る重要な制度です．

● ステップ2　わからない部分を質問しまくる

AIからの回答で理解できない部分があれば，どこがなぜわからないのかを具体的に伝えて，わかりやすく説明してもらいます．

▶プロンプトの例：「公開とはどういうことですか．中学生でもわかるように説明してください．」

ChatGPTの回答(ステップ2)

公開とは，ある情報や内容をみんなが見られるようにすることです．特許の場合，発明を出願してから原則1年6か月後に，その内容がインターネットや特許公報などで公開されます．これによって，他の人が同じ発明をしないようにしたり，新しい技術として参考にしたりできます．公開されることで，発明が社会に広がり，技術の進歩につながります．公開は誰でも見られる状態にすることで，秘密にすることとは反対の意味です．

● ステップ3 自分の理解度を確かめる

ある程度理解できたら，自分が正しく理解しているかどうか生成AIに確認します．このひと手間が，知識の定着を確実なものにします．

▶プロンプトの例：「以下の私の説明に誤りがあれば指摘してください．

　公開とは，特定の情報や内容を限定された範囲だ

けでなく，広く一般に見られる状態にすることを指します．特許制度における公開は，出願から原則1年8か月後に，発明の内容を特許庁が公報などを通じて誰でも閲覧できるようにすることです．これにより，同じ発明の重複を防ぎ，他の技術開発の参考資料として活用され，社会全体の技術発展を促進します．公開は独占の代償として発明内容を明らかにする重要な制度です．」

ChatGPTの回答（ステップ3）

あなたの説明は概ね正確でわかりやすいですが，1カ所だけ誤りがあります．
以下にその点を指摘します：
×誤りのある箇所：「出願から原則1年8か月後に」
○正しくは：「出願から原則1年6か月後に」
解説：特許出願の内容は，出願日から1年6か月（18か月）経過後に，特許庁により公開特許公報として公開されるのが原則です（早期公開制度を利用すればもっと早くなることもあります）．

AIを使って動画内容を超速で要約…グーグルNotebookLMを使った学習

● 動画を見返すことなく要点を効率的に学習する

最近では，専門的な技術や知識を解説した質の高いYouTube動画が増えており，それらを学習に活用する方が増えています．しかし，動画の内容が難しかったり，時間が長すぎたりすると，理解に時間がかかってしまうことがあります．また，知りたい内容が動画のどこにあるのかわからず，探すのに手間がかかることもあります．

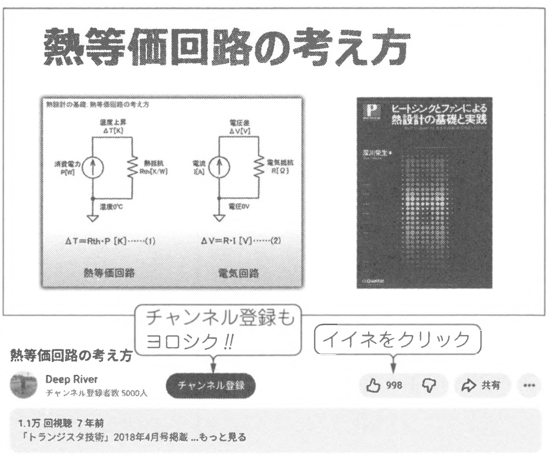


図1　筆者のYouTube動画「熱等価回路の考え方」をグーグルの生成AIツールNotebookLMに要約させてみる

https://youtu.be/sffMyPiVvig，筆者の著書である「ヒートシンクとファンによる熱設計の基礎と実践」（CQ出版社刊）をより理解するために製作された動画．この動画はトランジスタ技術2018年4月号の付録DVDにも収録されている

こうした課題を効率よく解決する方法として，生成AIが注目されています．ここでは，Googleが提供する生成AIツールNotebookLMを使い，私が作成した技術解説動画（**図1**）を例に，具体的な学習方法を紹介します．

● 動画内の欲しい情報が一目でわかる！ 便利に使いたいNotebookLM

NotebookLMは，Googleが提供する生成AIツールで，ほとんどの機能を無料で利用できます．YouTubeのURLを入力するだけで，その動画の文字起こしデータを自動で読み込み，内容に基づいた質問に答えてくれます．なお，ChatGPTの無料版ではYouTube動画の内容を直接読み込んで要約したり，質問に答えたりすることはできません（2025年11月執筆時点）．

NotebookLMを使うためには

https://notebooklm.google.com/

にアクセスし，Googleアカウントでログインします．

次に，新しいノートブックの作成をします（**図2**）．画面右上の「＋ 新規作成」ボタンもしくは左の「ノートブックを新規作成」をクリックすると新しいノートブックを作ることができます．

学習に使いたいソース（情報源，資料）をノートブックに追加します（**図3**）．無料版では，最大50個まで読み込むことができます（2025年11月現在）．

YouTube動画の追加方法は，**図3**の画面下中央付近の「YouTube」ボタンをクリックし，次の画面で参考にしたいYouTubeのURLを入力します．ここでは，筆者の動画のURL（https://youtu.be/sffMyPiVvig）を入力し，右下にある「挿入」ボタンをクリックします．すると，NotebookLMのメイン画面が開きます（**図4**）．

● 動画内容をプロンプトを入力して要約させる

図4のチャット・パネルの入力欄に，プロンプトを入力し，Enterキーもしくは右の矢印ボタンをクリックすると，チャット・パネルに，入力したプロンプトとAIからの回答が表示されます（**図5**）．

▶プロンプトの例：「『熱等価回路』について，初心者が理解できるように，300文字程度で要約してください．」

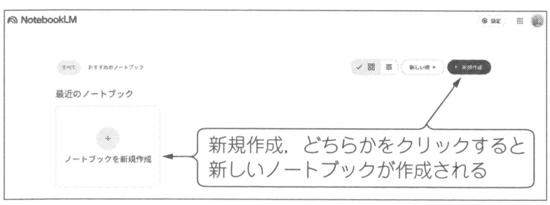


図2　グーグルの生成AIツールNotebookLMを使うために新しいノートブックを作成する



図3 リンクのYouTubeをクリックして情報源・資料（ソース）を追加する
次に表示される画面に参考にしたいYouTube動画のURLを入力する．追加できるデータはGoogleドライブのドキュメントやスライド，ファイル（PDF，txt，Markdown），音声（MP3），テキスト・データ，WebページのURL，YouTube（2025年11月現在）

NotebookLMの回答（動画の要約）

熱等価回路は，熱設計の基礎となる考え方です．これは，熱の現象を電気回路に置き換えて考える手法です．

具体的には，放熱性能の指標である熱抵抗（単位：K/W）を電気抵抗に，消費電力（P）を電流に，温度上昇（Δ T）を電位差（電圧）に相当させます．熱抵抗は，単位消費電力あたりの温度上昇を表し，値が小さいほど放熱性能が高いことを示します．

この回路を用いることで，半導体素子のジャンクション部で発生した熱が，ケースや放熱器を経由して周囲の空気へ移動する過程など，熱の流れをオームの法則から解析でき，温度と消費電力のバランスから，必要な放熱器の熱抵抗などを数値的に求めることが可能になります．

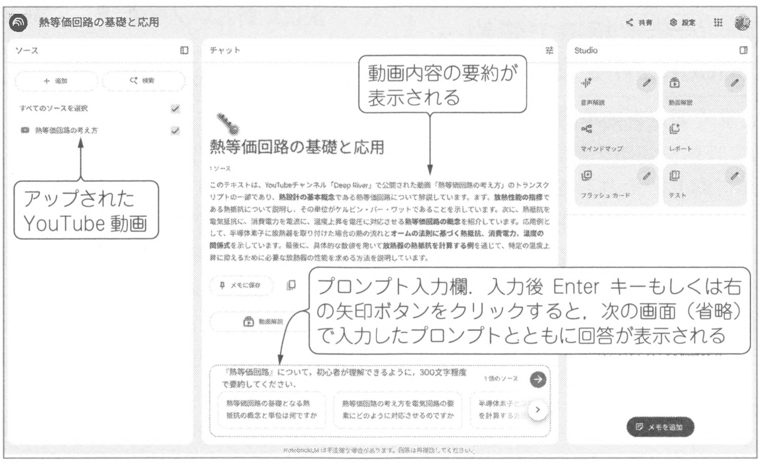


図4 NotebookLMにYouTube動画を追加すると動画の要約が表示される…ここからプロンプトを入力する



図5 Youtube動画についてプロンプトを入力するとAIからの回答が表示される
回答にある引用番号をクリックするとソースパネルに引用元が表示される

● 数字をクリックすると裏付けが容易にできる

AIが回答の根拠として，文末に付けられた①，②などの引用番号をクリックすると，ソース・パネルに引用元が表示され，AIが動画のどの部分を引用して回答を作成したのかがわかるため，ファクト・チェックを簡単にできます．

以上のように，動画をすべて視聴しなくても，要点を効率よく把握することが可能です．さらに，複数の動画を読み込ませて，内容を横断的に分析することもできます．

● 著作権侵害には要注意

ここで，知的財産権に関する注意点があります．他者が作成したYouTubeの動画を使いAIで学習する際は，著作権への配慮が必要です．AIによる分析や要約で得られたものは，必ずご自身の学習や研究といった私的利用の範囲にとどめてください．AIが生成した要約や解説などを，著作権者の許可や申請なくブログやSNS，動画などで有償・無償関わらず公開・配布すると著作権侵害にあたるおそれがあります．

AIを使ってPDF資料を超速で要約

● ハードコピーする前にAIに読み込ませる時代到来

NotebookLMは，特許公報や技術論文などのPDFファイルにも対応しています．ここでは私自身が発明者として関与した4件の特許公報を用いて，活用法を紹介します．

● 読むのがしんどい特許公報は，AIにお任せ！

図6に示した特許公報のPDFファイルをNotebookLMに読み込ませます．その後，以下のプロンプトを入力すると，AIが4件の特許公報の内容だけに基づいて，わかりやすい要約文を生成します(**図7**，**図8**)．

▶プロンプトの例：「それぞれの特許公報で示されている「発明が解決しようとしている課題」の違いについて，専門用語を使わずに，200文字以内でわかりやすく要約してください.」

NotebookLMの回答(PDFの要約)

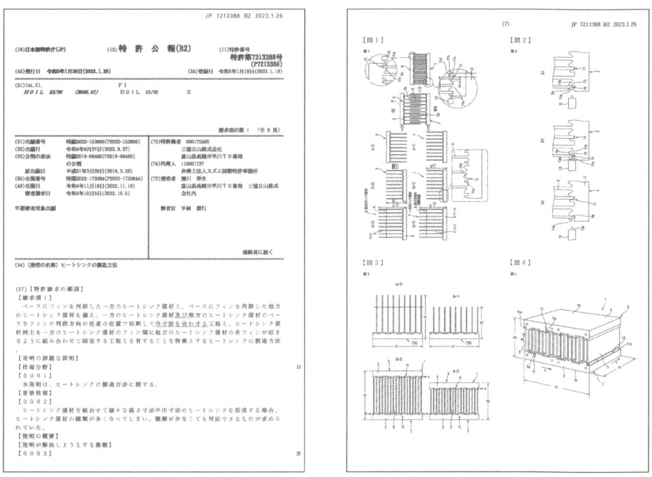
ご提示いただいた特許公報で示されている「発明が解決しようとしている課題」の違いを，専門用語を使わずに要約します(200文字以内).
特許第6645915号は，熱を逃がす面積を増やすためにフィンを密にするときの，製造時の成形不良を防ぎ，高い放熱能力を得ることを目指しています．
　一方、特許第6785706号は、ヒートシンクを組み立てる際の手順を簡略化し，かつ，熱が伝わる部分(フィンと溝)を確実に密着させることを目的としています．また，特許第7213388号と特許第7214535号は，用意する部品の種類を少なくしつつ，様々な高さや幅のヒートシンクを製造できるようにすることを目的としています．

＊　＊　＊

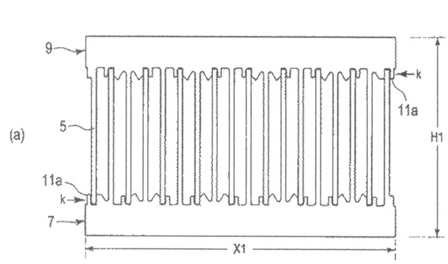
このように，NotebookLMを使えば，複数の資料を横断的に分析し，必要な情報をすばやく得ることができ，作業効率を飛躍的に高めることができます．

テクニック…画像やPDFの要約の仕方もAIに指示できる

最後に，追加したソースに対して，要約，情報抽出，比較・分析で使えるプロンプトを紹介します．



(a) 特許公報の内容（抜粋）



(b) 図の一部

図6　読むのがしんどい特許広報は生成AI(今回はNotebookLM)**にお任せ！**
PDFファイルの活用の例として使用した，筆者が発明者として関与した特許のうちの1つ，特許第7213388号「ヒートシンクの製造方法」の特許公報の内容の一部



図7　筆者が関与した特許をAIに要約させてみた
4件の特許公報が追加されたNotebookLM．4件の公報に基づいてAIによる要約が表示される

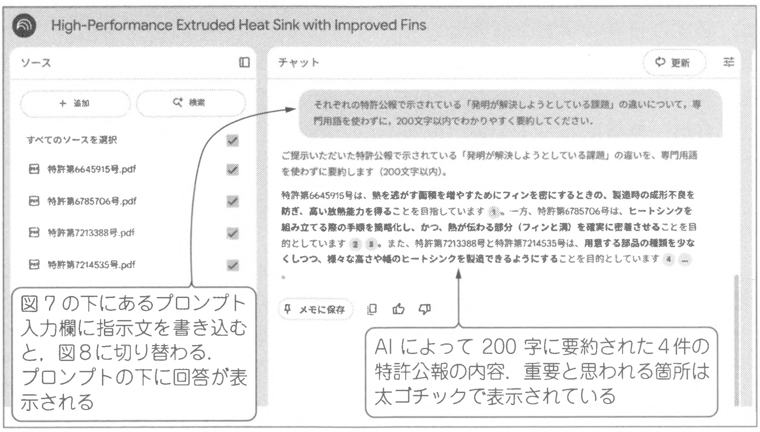


図8　要約の仕方もAIに指示できる
さらにこれら4件の特許公報について，AIに字数制限をして要約させることもできる．1つ1つの図面から読み取る手間が省け，作業効率を高めることにつながる

▶要約のプロンプトの例

「このPDFの内容を300字で要約してください.」
「この動画の結論部分だけをまとめてください.」

▶情報抽出のプロンプトの例

「○○という技術について言及している箇所をすべて抜き出してください.」
「○○に関する提案をリストアップしてください.」

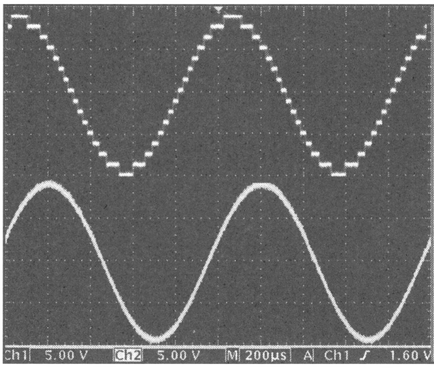
▶比較・分析のプロンプトの例

「2つの議事録の決定事項の違いを挙げてください.」
「レポートAとレポートBの主張の共通点と相違点を教えてください.」

▶アイデア出し・作成のプロンプトの例

「これらの資料を基に，新しい企画のアイデアを5つ提案してください.」
「この議事録の内容から，関係者に送る報告メールの文章を作成してください.」

連載



精度不良の70%を占めるADC周辺回路&部品誤差要因を攻略せよ

計測用16ビットA-D変換に学ぶプロのアナログ回路設計ノウハウ

第5回　マルチプレクサを使った時分割A-D変換の設計ノウハウ

中村 黃三 Kozo Nakamura

今回は，アナログ・マルチプレクサ(以後，MUX)で複数の信号を切り替えながら1個のA-Dコンバータ(以後ADC)により時分割処理を行うときのセトリング時間の考え方を解説します．

複数入力チャネルでADCは1つ…時分割A-D変換の要点

● 時分割処理のキモはセトリング時間

図1は，MUXにより複数のアナログ信号を1つのADCで数値化する場合の要点を示しています．ADCのスペック以外は，④バッファ・アンプのセトリング時間，前置フィルタの⑥フィルタ応答，⑦MUXのメモリ効果による誤差要因です．

DCレベルが大きく異なるチャネル間の切り替えではMUXの出力はステップ波形となります．そこで，同図のように前置フィルタがMUXとバッファの間に入る構成では，前置フィルタには周波数特性の切れは良くても時間波形のリンギング・テールが長くなるチェビシェフ応答のフィルタは避けるべきです(各フィルタ応答の波形は第4回図7参照)．

④のバッファ・アンプのセトリング時間は，後述するオーバラップ・モードでチャネルあたりのスキャン速度を最大化する場合に重要となります．加えて，MUXからADCのサンプル&ホールド回路(以後，S/H回路)までの総合セトリング時間も定量的に把握する必要があります．

● 時分割処理にはシーケンシャル・モードとオーバラップ・モードがある

MUXの切り替えタイミングを**図2**に示します．(**a**)シーケンシャル(またはワンショット)モードと(**b**)オーバラップ・モードとがあり，**図2**はチャネル切り替えにおけるそれぞれの変換プロセスを示したものです．

図中の時間分類t_{ACQ}やt_{STL}は，本稿での説明に用いたもので一般性はありません．デバイス・メーカのデータシートも各社で統一は取れておらず，読み手から見た場合，不便極まりないところです．

時分割A-D変換①…シーケンシャル・モードの回路構成

● 用途

シーケンシャル・モード方式に向くのは，計算による2次物理量などA-D変換データの後処理に主体を置き，変換間隔が不定期でもよいアプリケーションです．チャネルを切り替えてA-D変換し，そのデータの後処理が終わったら別のチャネルに切り替えてまたA-D変換というように，回路動作が順を追って行われることからシーケンシャル・モードと呼ばれています．

● 適した前置フィルタ

アプリ例は，**図3**(**a**)で示すように各チャネル切り替えまで時間的に余裕があり，かつチャネルあたりのA-D変換間隔が不均一で高密度でない運用のものです．こうしたアプリでは，**図1**のようにMUXとバッファの間にバターワース応答かベッセル応答の前置フ

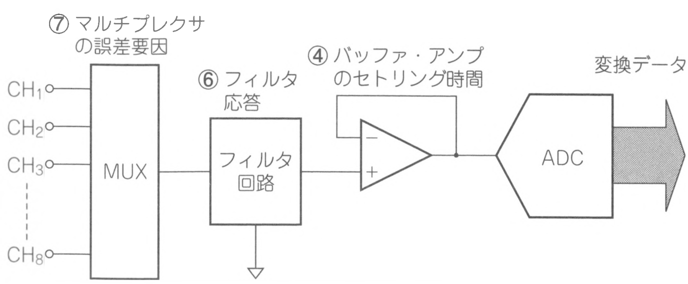
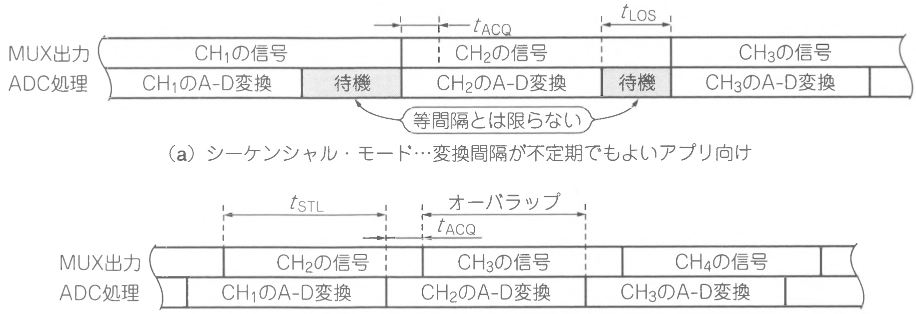


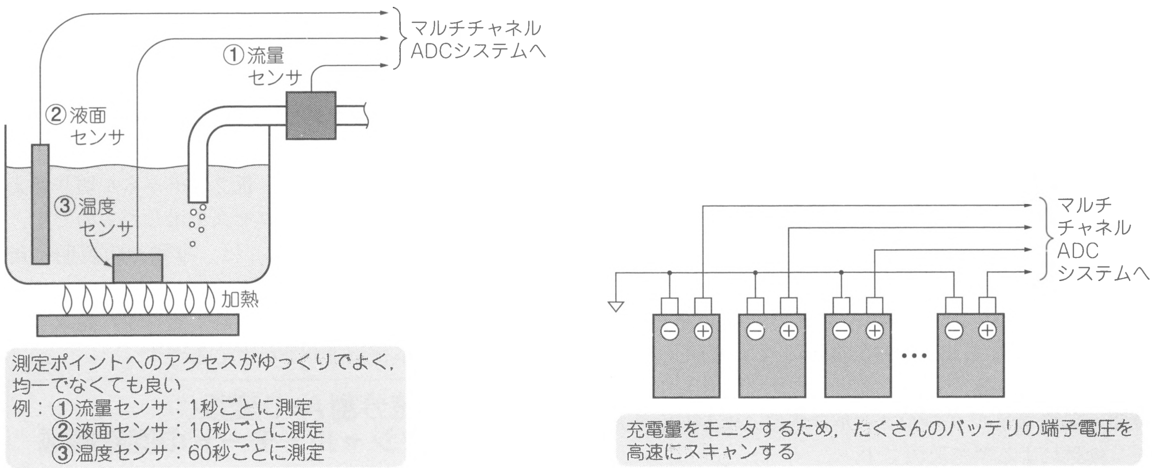
図1　マルチプレクサにより複数のアナログ信号を1つのADCで数値化する場合の要点
ADCのスペック以外に，④バッファ・アンプのセトリング時間，前置フィルタの⑥フィルタ応答，⑦MUXの誤差要因について配慮が必要．第1回，図2より抜粋



(a) シーケンシャル・モード…変換間隔が不定期でもよいアプリ向け

(b) オーバラップ・モード…各チャネルを高速に等間隔でスキャンするアプリ向け

図2 チャネル切り替えタイミング
t_{ACQ}[s]：ADC内部のサンプル＆ホールド(S/H)回路のセトリング時間，t_{LOS}[s]：システムが別の仕事を行うことによるロス時間，t_{STL}[s]：図4で示すMUXからS/H回路までの総合セトリング時間



(a) プロセス制御システム…シーケンシャル・モードが適切

(b) バッテリ出荷時の充電システム…オーバラップ・モードが適切

図3 時分割処理の種類と応用例

ィルタを置くことが可能です．さらに時間的余裕があるのなら，切れの良いチェビシェフも勿論使えます．どちらにしても高周波リークのない奇数次のサレンキー型かMFB形式のフィルタを選びます(第4回参照)．

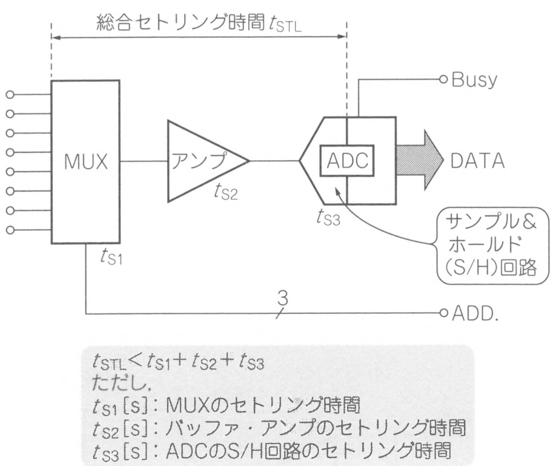


図4 オーバラップ・モードの効率アップは総合セトリング時間t_{STL}を知ることがキモ
総合セトリング時間t_{STL}は各デバイスのセトリング時間を単純に加算した値よりも短い．デバイスが決まったら実測値を既知とする

時分割A-D変換②…オーバラップ・モードの回路構成

● 用途

オーバラップ・モード方式に向くのは，**図3(b)**に示すように各チャネルの測定間隔が高密度で，かつ等間隔であることが望ましいアプリケーションです．チャネル2のA-D変換が始まるとすぐにMUXをチャネル3に切り替え，**図4**で示すMUXからADC内部にあるサンプル＆ホールド回路(以後，S/H回路)までの全回路がセトリングするのを待ちます．**図2**で示したように，チャネル3の信号に対するセトリング時間t_{STL}の待ち時間をチャネル2のA-D変換に重ねる(オーバラップ)ことからこの名前が付いています．

● 適した前置フィルタ

オーバラップ・モードではチャネルを高速に切り替えるため，総合セトリング時間t_{STL}を最小化する必要があり，MUXの出力側に前置フィルタを配置できません．チャネルごとに入力側にフィルタをつける必要

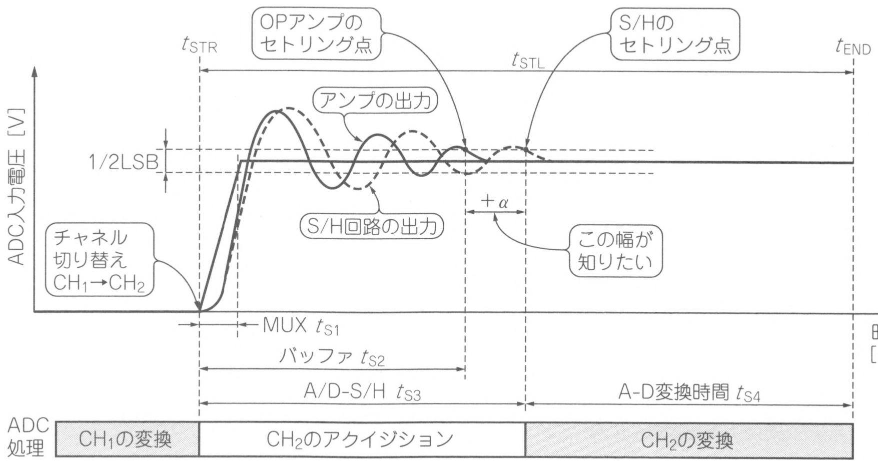


図5 総合セトリング時間はバッファ・アンプのセトリング時間t_{S2}が支配的
MUXのチャネル切り替え時からA-D変換ができるまでの時間は，バッファ・アンプのセトリング時間t_{S2}が支配的ではあるが，ADCのサンプル&ホールド回路(S/H)によるセトリング点で+α遅れる．この+αの時間幅は計算では求まらないので実測が必要

があります．ただし，扱う信号が直流や脈流のDC信号だからと言って，OPアンプなしのRCによるパッシブ・フィルタをつけるのはNGです．理由はメモリ効果によるMUXの応答遅れの要因となるからで，このことは後述します．

MUX切り替えの時間的ロスを減らすカギ…まずは各段のセトリング時間の把握

● 総合セトリング時間は各段の単純な加算じゃない

図5で示す各デバイスのセトリング時間t_{S1}～t_{S3}を単純に加算して総合セトリング時間t_{STL}を求めると，時間的ロスが生じます．なぜなら図5で示すように，前段のデバイスのセトリングが終了してから，次のデバイスが動作を開始するわけではないからです．

● 支配的なのはバッファ用OPアンプだが+αが難しい

表1は，総合セトリング時間t_{STL}を知るための実験で使った各デバイスのセトリング時間やステップ応答時間(以後，応答)のスペックです．t_{STL}で支配的なのは，バッファに使うOPアンプのセトリング時間です．

ADCのS/H回路における応答の定義はやや複雑ですが，図5に示した+αの概念を知るには避けて通れない項目なので，その詳細は後で解説します．

表1にあるこれらの値はそれぞれのデータシートから抜き取ったものですが，デバイスの用途に合わせてスペックを規定しているため，デバイス間のセトリング/応答時間を同一条件下で比較することは困難です．

各アナログ系デバイスでのセトリング時間と応答時間の使い分け

ここで，アナログ系デバイスにおけるセトリング/応答時間の使い分けについて説明します．

● セトリング時間

セトリング時間は，表1に示した値はデバイスが反応して最終出力値の99.99 %(＝残留誤差0.01 %)以内までに出力が安定する時間を指します．この記述は各デバイス・メーカで同じです．

高精度用途向けのOPアンプなどでは，データ・シート中に0.003 %の表記もありますが大抵は0.01 %です．実際のところこの表記は16ビットADCを用いたアプリケーションには役に立ちません．16ビットADCの1/2LSBへのセトリングは0.00075 %への時間なのでかけ離れています．

出力が図5で示したように振動(リンギング)している場合は，それが上の数値まで収まる時間となります(2025年10月号の163ページ参照)．

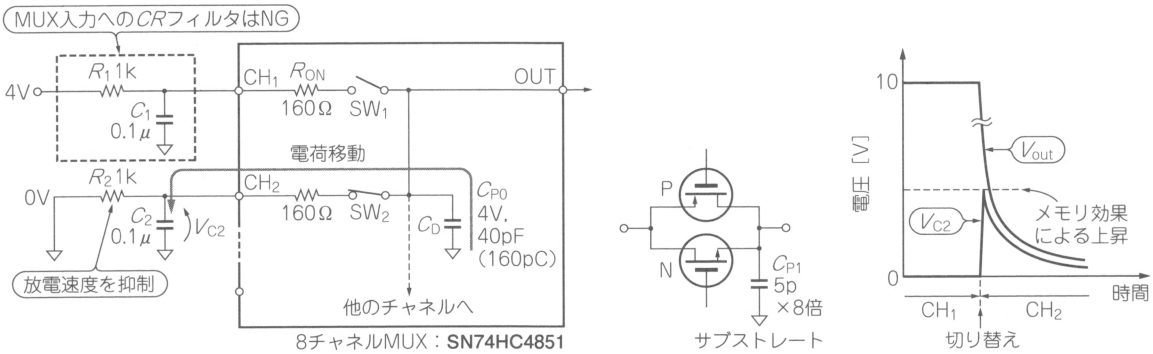
● 応答時間

応答時間は，デバイスが反応して最終出力値の90 %程度(メーカやデバイスによって数値は異なる)まで到達する時間を指します．

図5の中では，点線で示す最終段のS/H回路の応答

表1 マルチプレクサからA-D変換器までのセトリング時間が時間的ロスになり得るがバッファ用OPアンプが支配的
実験で使った各デバイスのデータシートから抜粋したステップ応答性能．いずれもテキサス・インスツルメンツ製．同一条件下での比較ではないが，バッファに使うOPアンプのセトリング/応答時間が支配的であることは分かる

デバイスの機能	型 番	セトリング/応答時間	説 明
1チャネル汎用MUX	TS5A3159A	t_{S1}＝35 ns	出力電圧が入力電圧の90 %に達する時間
バッファ・アンプA	OPA132	t_{S2}＝1 μs＝1000 ns	アンプの出力振幅が入力電圧の0.01 %まで安定する時間
バッファ・アンプB	TL2771	t_{S2}＝300 ns	（同上）
A-Dコンバータ	ADS8422	t_{S3}＝70 ns	アクイジション時間．変換時間とt_{S3}は合わせて250 ns(4 MHz)



(a) MUX内部の浮遊容量C_DからC_2への電荷移動の様子　(b) SWの寄生容量　(c) 電荷移動によるV_{C2}の増大

図6　*RC*フィルタによるメモリ効果はMUXのセトリング時間t_{S1}を大幅に伸ばす要因
メモリ効果はMUXの寄生容量から*RC*フィルタへ移動した電荷により起こる

が当然ながら一番遅れています．それでもS/H回路はバッファの出力が変動し始めてからほぼ同時に追従し始め，その出力がADCの1/2 LSBまでセトリングする時間t_{S3}はt_{S2}より少し遅い$+\alpha$分だけ長くなります．

● ＋αの応答遅れの時間幅は実験で求めるしかない

そこで$+\alpha$を知りたいところですが，この値はデータシートから求められません．言い換えれば，実機を製作して求めるしかないということです．手っ取り早くシミュレーションという手も浮かびます．しかし筆者はそのデータを参考にはしますが，nsを争うアプリケーションの設計値にすることには懐疑的です．

マルチプレクサMUXの応答を遅らせるメモリ効果とは

図4で示したデバイスの中で最も速いのは，**表1**で見ると，1チャネル汎用MUXの応答ですが，**図6(a)**で示すように，入力に*RC*だけで構成されたパッシブ・フィルタを直接取り付けると話は変わります．以下，8チャネルMUXのSN74HC4851を例に説明します．

● MUXの寄生容量に電荷が充電

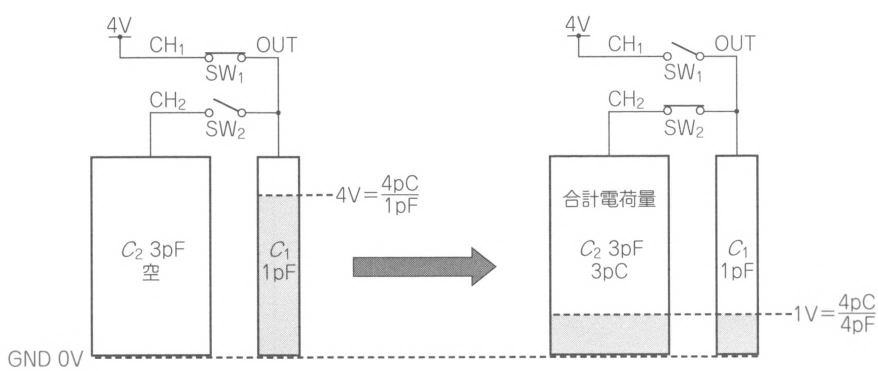
図6ではCH_1(チャネル1)の入力電位が+4Vで，現在MUXで選択されているCH_2の電位が0Vとなっています．

MUX内にはMOSFETで構成され8回路ぶんのSW(スイッチ)があります．1回路ごとにドレインとサブストレート(素子間分離のための絶縁層)間に寄生容量C_{P1}～C_{P8}(図の例では各5pF)が存在するため，これらが束なって40pFの総合寄生容量C_{P0}を構成しています．このC_{P0}には，MUXがCH_1を選択したときに充電された160pCがたまっています．ちなみに1pCの電荷は，1pFのコンデンサ両端電圧を1V押し上げる量なので，4V×40pFで160pCとなります．

● MUXの寄生容量の電荷が*RC*フィルタに再配分され切り替え後のチャネルでの誤差となる

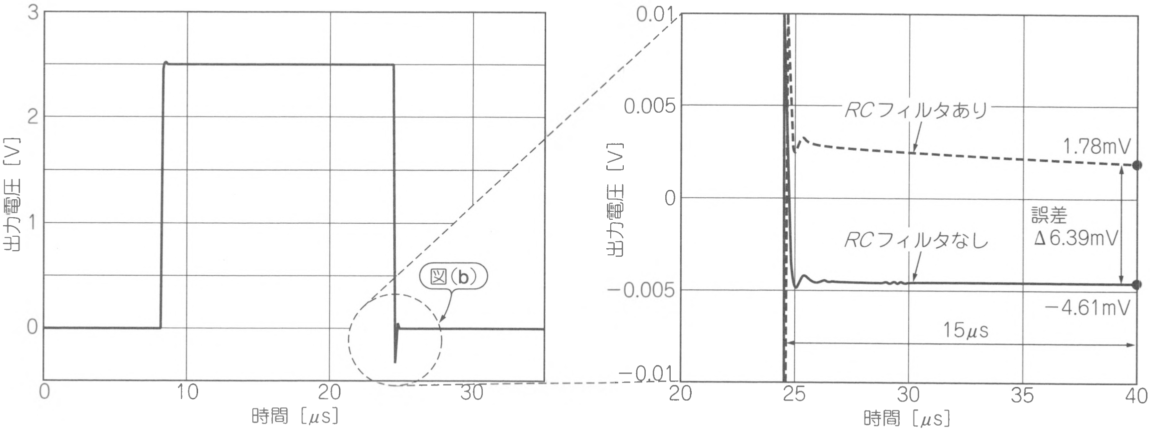
CH_2が選択されるとC_{P0}の電荷は，フィルタを構成する外部コンデンサC_2に移動して再配分され，その結果C_2の両端電圧V_{C2}が**図6(b)**のように上昇します．**図7**に，コンデンサ間における電荷移動とコンデンサ両端電圧の変化のようすを示します．

再配分された電荷はR_2を経由して**図6(b)**のように時間と共に減少していきます．C_2の値が0.1μFと大きいので上昇電圧はわずかですが，それでも16ビットでA-D変換した場合は数十LSB相当の誤差となり



(a) SW_1ONでC_1充電　(b) SW_2ONでC_2に電荷が移動

図7　メモリ効果の原因となる電荷の移動
SW_1とSW_2の切り替えでC_1とC_2間で電荷の移動が発生し，C_2の電位を押し上げる．1pCは1pFのコンデンサの両端電圧を1Vまで押し上げる電荷量



(a) 全体　　(b) 立ち下がりの拡大

図8　MUXのメモリ効果を*RC*フィルタの有無で比較した実験結果
図4の部品構成でのバッファ・アンプ出力．(b)はA-D変換したデータをExcelで処理して描いた．ADCの入力レンジが0〜5Vの5Vフルスケールとすれば1LSBは76.3μVなので誤差6.39mVは83.6LSBに相当する

ます．両端電圧の増加量は前のチャネルの電位に依存するので，こうした現象をメモリ効果と呼んでいます．

● 実験結果

図8に，実際の実験結果を示します(次回で紹介するエッジ・シフト法によるもの)．チャネル切り替えから15μs経過しても，放電カーブがエクスポーネンシャルで遅いため6.39mVの誤差が残っています．この誤差は，ADCの入力レンジが0〜5Vの5Vフルスケールとすれば，1LSBは76.3μVなので83.6LSBに相当し変換データの精度は10ビット相当となります．

● メモリ効果はバッファ・アンプを追加すれば解消する

*RC*フィルタをつけない場合は2μs以下でセトリングしているので，*RC*フィルタを付けただけでセトリング時間が桁違いに伸びるということです．

この問題は，コストは上がりますが**図9**のように*RC*フィルタとMUXの間にバッファ・アンプを挿入することで解決します．この方法を用いるとC_{P0}に残留した電荷は，チャネルを切り替えた瞬間にバッファ・アンプの出力ピンへ吸収され，**図8**の*RC*フィルタなしの波形に近づきます．追加したバッファ・アンプによる吸収を早めるには，出力電流I_Oの大きいOPアンプを選択します．例えばOP07は高精度ですがI_Oが小さくスルー・レートも遅いので，同じく高精度でも両者が大きいOP27を選ぶという具合です．

セトリング時間の＋αに関わるADCのS/H回路の動作

逐次比較型ADCにより効率的で精度の高い高速スキャンを達成するには，**図10**で示すS/H回路とA-D変換周期(サンプリング・レート)の関係を知ることが重要です．これにより**図5**で示した＋αの概念がより明確になります．

以降，実際のデバイスADS8422を元に解説を進めます．

● サンプル＆ホールド(S/H)回路の役割

アナログ信号は時間軸に対して，切れ目なく無限の細かさで変化する量です．こうした信号を数値化するには，時の1点(サンプリング点)の電圧値を切り出して，A-D変換中はその電圧値を保持(ホールド)して

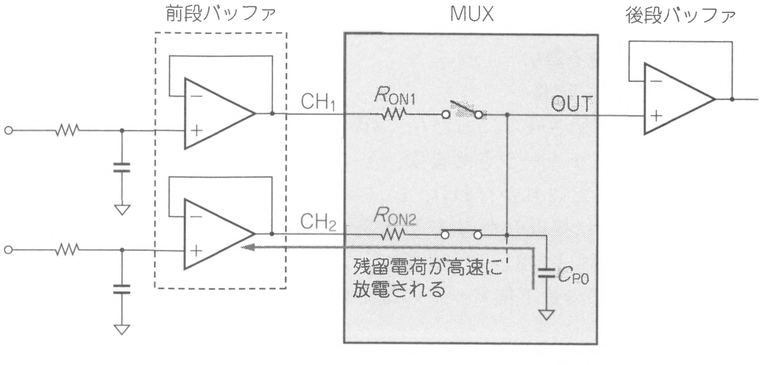


図9　メモリ効果の対策にはOPアンプによるバッファリングが有効

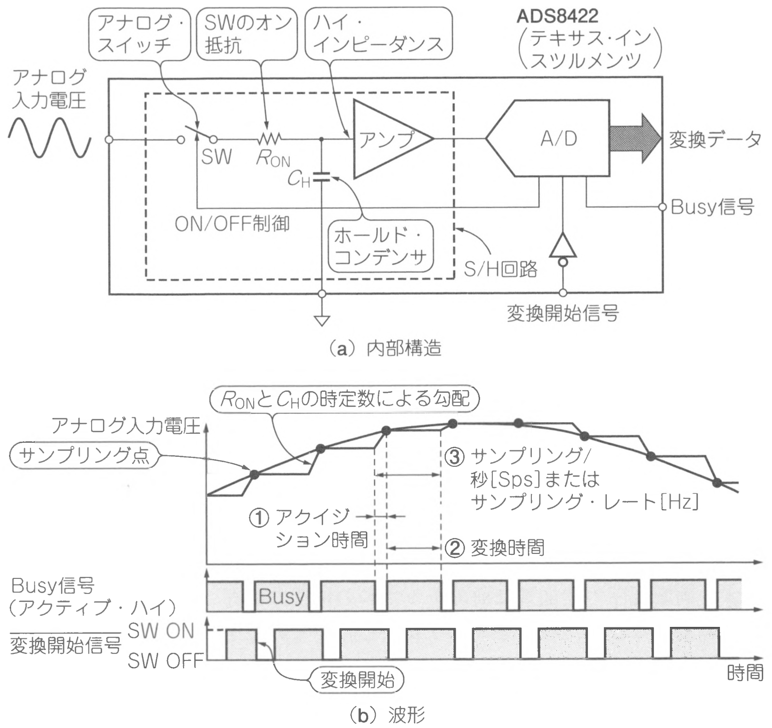


図10　逐次比較型ADCのS/H回路の内部構造と役割(ADS8422の例)
アナログ信号は時間軸に対して切れ目なく無限の細かさで変化する量．これを数値化するには，時間軸上の一点(サンプリング点)の電圧値を切り出してA-D変換中はその電圧値を保持(ホールド)しておく必要がある．S/H回路はそれを担う

おく必要があります．それを担うのがS/H回路です．

S/H回路の基本構成はアナログ・スイッチSWと，時の1点を切り出した信号電圧を保持するコンデンサC_Hから成り立ちます．保持された電圧がドループ(リークによるC_H両端電圧の目減り)しないように，ハイ・インピーダンス入力のアンプでバッファリングしADCのコアはこの出力電圧をA-D変換します．

ADCの変換サイクルは①アクイジション時間と②変換時間とに分かれ，これらを足した合計時間を秒あたりのサンプリング回数ということで，③サンプリング/s(Sps＝Sampling per second)で表します．

Spsの逆数を取ってサンプリング・レート(単位はHz)とも表現します．データシート上での使い分けはこれといった決まりはありませんが，単に変換速度を表すときはSps，扱える最高信号周波数を意識した表記ではサンプリング・レートを主に使っています．

● S/H回路の振る舞い

▶アクイジション時間

A-D変換を開始させるにあたり，SWをONにして信号電圧をC_Hにチャージさせます．A-D変換信号ピンを“H”にするとこれが行われ，C_Hの両端電圧が規定の誤差幅までに接近したらA-D変換が可能となります．この誤差幅は1/2 LSBが相場で，これは電圧換算した当該ADCの最下位ビットの電圧幅の半分となります．

さてチャージによるC_H両端の電圧上昇の速度ですが，SWへ直列に入ったオン抵抗R_{ON}とC_Hの容量による時定数でその勾配で決まります．チャージが完了するまでには一定の時間が必要となり，これをアクイジション時間と呼びます．

逐次比較型ADCでは，変換開始信号の間隔は広い分には何の制約もなく，極端な例では1日1回でもOKです．一方フルスピードで回す場合は，アクイジション時間の分だけA-D変換開始を待たなければなりません．ADS8422ではこの時間は最低70 nsです．

▶変換時間

A-D変換信号ピンを“H”から“L”にすると，SWはOFFになりC_Hは外部のアナログ信号から切り離され変換が開始されます．

変換が開始されるとBusy(ビジー)フラグ・ピンが“H”になり，変換が終わるとBusyフラグは“L”となって変換データを読み出すことができます．

オーバラップ・モードでは，読み出しのためにA-D変換にウエイトをかけるのは効率が下がるので，Busyが“L”になってアクイジション時間が経過した時点ですぐに次のチャネルのA-D変換を開始させます．変換されたデータは，次の変換によりBusyが“H”になっても200 ns間は読み出せます．それを過ぎるとADCのデータ・レジスタには新たな変換データが上書きされます．

A-D変換信号ピンを“L”から“H”に戻すタイミン

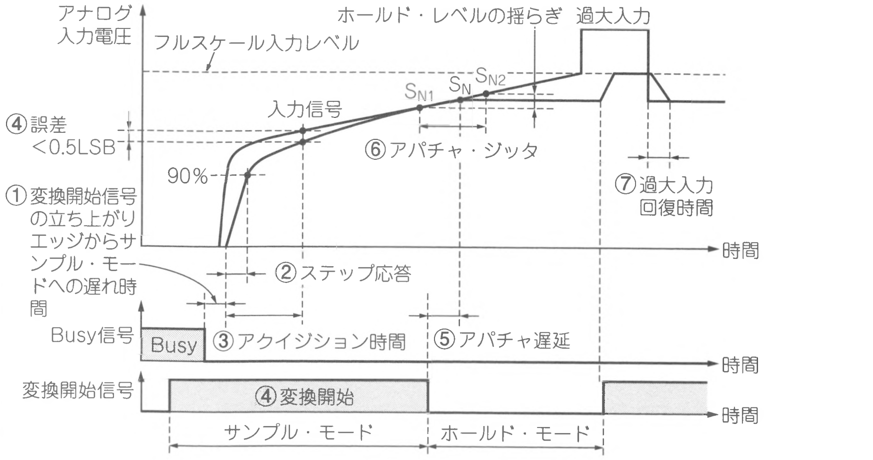


図11　ADS8422のS/H回路とA-D変換の時間スペック

S/H回路における②ステップ応答時間は，ホールド・コンデンサC_H両端の電圧がアナログ入力電圧の90％に到達するまでの時間．ただしADCは90％では変換開始できずC_Hの両端電圧が④誤差1/2 LSBまで到達してからとなる．この表記が③アクイジション時間．⑤アパチャ遅延は④変換開始から図6のスイッチSWがOFFになるまでの遅延時間．⑥アパチャ・ジッタはこの遅れの時間方向における揺れ．⑦はADCへ過入力を与えたときの飽和からの回復時間

グはいつでもよいですが，次の“H”から“L”に落とすまで時間幅を100 ns以上取る必要があります．オーバラップ・モードで最高速で回す場合は，Busyが“H”になった時点ですぐにA-D変換信号ピンを“L”から“H”に戻します．さもないとADCのウエイト時間が広がり，チャネル・スキャンに対するロスが生じます．

実際のS/H回路とA-D変換の時間スペック

S/H回路には時間に関わるスペックが多数あります．**図11**はC_Hによるホールド電圧が0 Vから始まることを前提にした，ADS8422のS/H回路とA-D変換関係の時間スペックです．扱う信号がDCの場合やシーケンシャル・モードでADCをゆっくり回す場合は気にかけないでよいスペックもあります．

● SWのサンプル・モードへの応答遅れ時間

①変換開始信号の立ち上がりエッジからサンプル・モードへの遅れ時間は，**図10(a)**で示したスイッチSWの応答遅れです．A-D変換が終了(Busyが“L”)したとき，変換開始信号が“H”になっていればサンプル・モードに入りますが，実際にSWがONなるタイミングは①で示す時間分遅れます．ADCに与えるべきアクイジション時間には①の遅れを加える必要があります．

● S/H回路におけるステップ応答の定義

②ステップ応答は，SWがONになってからC_H両端の電圧がアナログ入力電圧の90％に到達するまでの時間と定義されています．ただしADCの場合，90％では変換開始できないので，このスペックは無視してもよいでしょう．MUXの切り替え速度も同じ定義を使用しています．

● アクイジション時間の定義

③アクイジション時間はC_Hの両端電圧が信号電圧の1/2 LSBまで到達する時間です．指定されたアクイジション時間より短い時間経過で変換を開始すると，変換データは不正確になります．

● 変換開始からSWがOFFになるまでの時間遅れ

⑤アパチャ遅延は④変換開始から**図10(a)**のスイッチSWがOFFになるまでの遅延時間です．AC波形に対するサンプリング点の誤差となり，動きが速い過渡波形のフィードバック情報をもとに自動制御をかける場合の障害となります．

● アパチャ遅延の時間的振れ幅

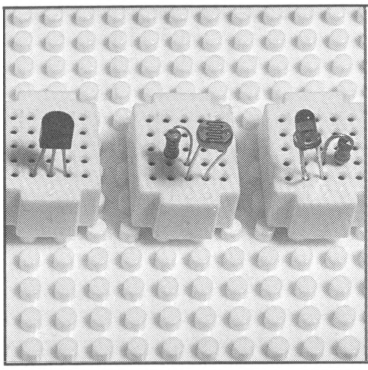
⑥アパチャ・ジッタは，⑤アパチャ遅延の時間方向における揺れ幅です．この揺れは，SWのON/OFF制御するロジックのノイズ性の閾値変動によって生じます．アパチャ・ジッタはAC波形の形を乱す要因となりますが，DC系のアプリでの影響はさほど大きくありません．

● ADCのサンプリング速度を著しく阻害する過負荷入力

⑦の過負荷回復時間は過入力によりADC内部のアンプ系を飽和させた場合，正常な動作に復帰するまでの時間です．オーバラップ・モードで高速にチャネルをスキャンするアプリケーションにはADCをドライブするバッファ出力にクランプ回路をつけて，アナログ信号がADCの入力レンジ外にならない工夫が必要です(重要)．クランプ回路が内蔵されたバッファを選ぶのも1つの選択です．

＊　＊　＊

次回はセトリング時間の観測を可能にするエッジ・シフト法と，実際のデバイスの測定結果を掲載します．



Uno R4時代はまた一段と便利に！

Wi-Fiもデータ・クラウドも完備！ Arduino純正IoT実験ラボ

第3回 Nano×GPSモジュールMAX-M10S！ SDカード・ロガー

宮田 賢一 Kenichi Miyata

新時代のArduino Uno R4 Wi-Fi版やArduinoが提供するIoTデータ・クラウドなど主に純正品を使って，各種センサによるIoT実験などを行います．

今回はGPSモジュールとArduino Nano R4を使って，移動記録をSDカードに保存する簡易GPSロガーを製作します(**写真1**)．取得データはGoogleマップ上に軌跡として表示できます(**図1**)．

今回のキー・デバイス…GPSモジュール

本実験は，GPS(Global Positioning Sytem；全地球測位衛星システム)注1から電波を受信し，位置と時刻のデータを取り出します．GPS(正確にはGNSS)衛星から電波を受信しデータを取り出すモジュールとして，MAX-M10S(u-blox)を搭載したSSCI-104371［スイッチサイエンス，税込み6,600円］の外観を**写真2**(**a**)，主な仕様を**表1**に示します．MAX-M10Sでは，UARTまたはI^2Cで情報を取り出せます．今回はI^2Cを使いました．

このモジュールは，SMAコネクタをもつ外部アンテナが必要です．ここでは**写真2**(**b**)に示すL1/B1周波数対応GPSアクティブ・アンテナYG0035 AA(Quectel)を取り付けました．

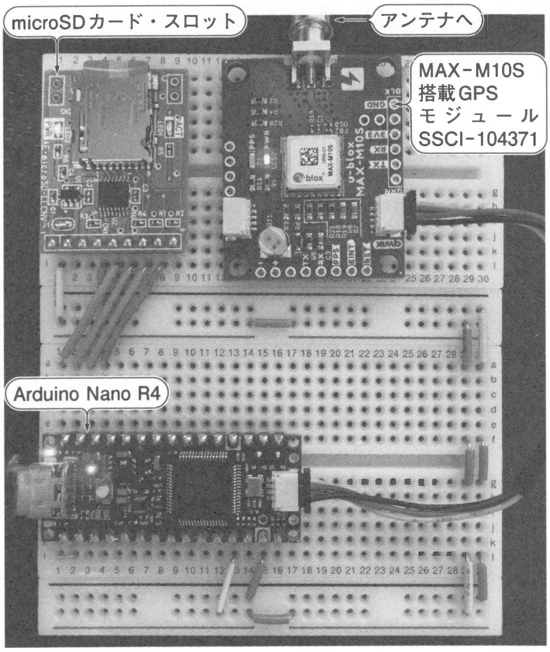


写真1　GPSモジュールとArduino Nano R4を使って移動記録を記録する簡易GPSロガー

● GPS衛星から送られてくる情報

GPS衛星から送信される情報には，衛星と受信機の間の距離を計算するほか，ナビゲーション用に次の情報が含まれています．

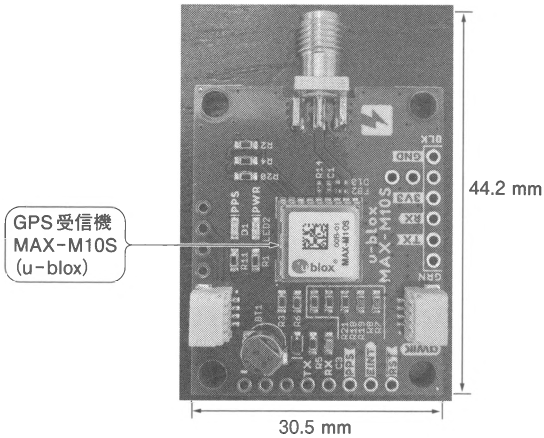
- GPS衛星がもつ時刻
- 衛星の位置と速度を計算するためのパラメータ(衛星軌道の半径，離心率，軌道傾斜角など)
- 地球上の電離層による遅延の推定値
- GPS時刻とUTC(協定世界時)との差(うるう秒など)

注1：GPSは米国が管理している測位システムで，日本，米国，ロシア，EUなどそれぞれが管理している衛星測位システムの総称はGNSS(Global Navigation Satellite Sytem)です．本稿では，GPSで統一します．

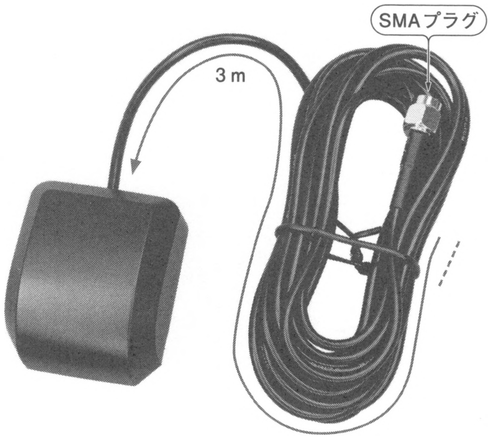


図1　GPSロガーで取得した緯度・経度はGoogleマップにプロットできる

マーカのタイトルとして使用する列に，1番目のフィールド(時刻)を選択する



（a）MAX-M10S搭載GPSレシーバ・モジュールSSCI-104371
（スイッチサイエンス，税込み6,600円）



（b）L1/B1対応GPSアクティブ・アンテナYG0035AA
（Quectel，スイッチサイエンスで税込み1,980円）

写真2　u-bloxのGPS(GNSS)受信機搭載モジュールとアクティブ・アンテナを自動車に取り付ける

複数の衛星から受信したこれらのデータを使って，GPS受信機では現在位置と移動方向，移動速度を求めています．なお現在位置と速度は地球を中心とする直交座標系(WGS-84 ECEFと呼ぶ)を基準として得られます．

製作物

● GPSロガーの機能

本実験では，次の使い方を想定しました．

- GPSモジュールは自動車内に設置する
- 取得した位置情報はSDカードに保存する
- 保存したデータをGoogleマップ上で表示する

また，Arduinoは，パソコンと接続しない状態で動作させるため，モバイル・バッテリから電源を供給することにします．データはmicroSDカードに保存しておき，自宅のパソコンからデータを取り出せるようにします．

データは，Googleマップのサービスで読み取れるように，CSV形式にします．

表1　汎用Qwiicコネクタ I/O！ MAX-M10S搭載GPSレシーバ・モジュールの主な仕様

項目		仕様
対応GNSS注1		GPS，GLONASS，Galileo，BeiDou(同時受信)
水平精度		1.5m
最大更新レート		10Hz
初回測位時間		24秒(コールド)，1秒(ホット)
最高速度		500m/s
速度精度		0.05m/s
最大高度		80,000m
方向精度		0.3度
タイム・パルス精度		30ns
電圧		3.3V(電源，I/O)
マイコン・インターフェース		UART，I²C
外部コネクタ	ディジタル	Qwiic×2
	RF	SMA(外部アンテナ)
オンボード・バッテリ		搭載

● システム構成

システム全体の結線を図2に示します．microSDカードにアクセスするために，microSDカード・スロット・レベルシフタ付き基板キットAE-microSD-LLCNV(写真3)を使います．

この基板は，5V電源系に直結できるようにレギュレータを搭載しているのが特徴です．マイコンとの接続はSPIですので，ArduinoのデフォルトSPIピンに必要な信号線を接続します．

今回使用するGPSモジュールはQwiicポートを搭載

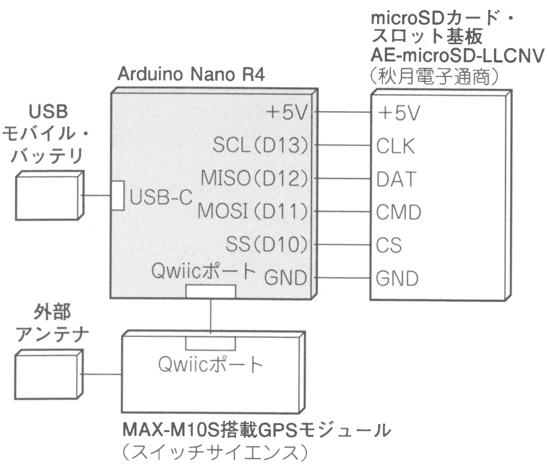


図2　移動データを記録する簡易GPSロガーの構成

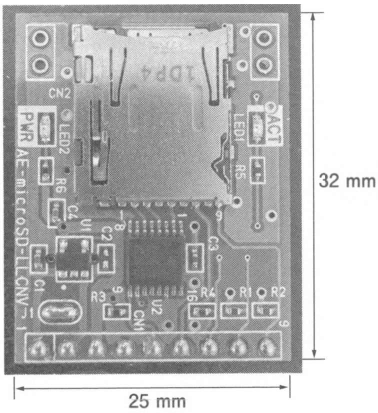


写真3　秋月で500円で入手できるSDカード・スロット・モジュールを使って測位データを保存する
microSDカード・スロット・レベルシフタ付き基板キットAE-microSD-LLCNV(秋月電子通商，税込み480円)

しているので，Arduino Nano R4とはQwiicケーブルを使って接続できます．GPSモジュール上にはQwiicポートが2つありますが，どちらのポートを使っても構いません．

Arduinoプログラム

本実験では**表2**に示すArduinoライブラリを追加で使用します．プログラム(Arduinoではスケッチと呼ぶ)を**リスト1**に示します．

Arduino IDEのライブラリ・マネージャを使って，事前にインストールします．

● 動作状況を示すためにRGB LEDを使用

本システムはパソコンがない環境で動作させるため，マイコンの動作状況を示すArduino Nano R4のRGB LEDを活用します．

- GPSモジュールの初期化に失敗→赤LEDを点灯
- SDカード・モジュールの初期化に失敗→緑LEDを点灯
- 正常動作→青LEDを点灯

表2　本実験で必要なライブラリ
Arduino IDEのライブラリ・マネージャで事前にインストールする

ライブラリ名	提供元	内　容
SparkFun u-blox GNSS v3	SparkFun	MAX-M10Sを含むGNSSモジュールの制御
SD	Arduino, SparkFun	SDカードの制御

リスト1　GPSモジュールとArduino Nano R4を使った簡易GPSロガーのプログラム

```
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <SparkFun_u-blox_GNSS_v3.h>

SFE_UBLOX_GNSS myGNSS;
const int chipSelect = 10; // SPI CSピン

void setup()
{
  Serial.begin(115200);

  pinMode(LEDR, OUTPUT); digitalWrite(LEDR, HIGH);
  pinMode(LEDG, OUTPUT); digitalWrite(LEDG, HIGH);
  pinMode(LEDB, OUTPUT); digitalWrite(LEDB, HIGH);

  // GPSモジュールの初期化
  // QwiicポートのI2CはWire1を指定する
  Wire1.begin();
  if (myGNSS.begin(Wire1) == false) {
    Serial.println("u-blox GNSS not detected.");
    // 無限ループで処理を停止させる
    digitalWrite(LEDR, LOW);
    while (1);
  }
  // SDカードの初期化
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("SD init failed!");
    digitalWrite(LEDG, LOW);
    while (1);
  }
  Serial.println("SD card initialized.");

  // ヘッダを書き込み(なければ)
  if (!SD.exists("log.csv")) {
    File logFile = SD.open("log.csv", FILE_WRITE);
    if (logFile) {
      logFile.println("# 時刻,緯度,経度");
      logFile.close();
    }
  }
  digitalWrite(LEDB, LOW);
}

void loop()
{
  // すべての情報を取得し内部にキャッシュする
  if (myGNSS.getPVT()) {
    // 時刻取得(UTC)
    char timestamp[30];
    snprintf(timestamp, sizeof(timestamp),
             "%04d-%02d-%02dT%02d:%02d:%02dZ",
             myGNSS.getYear(), myGNSS.getMonth(),
                                 myGNSS.getDay(),
             myGNSS.getHour(), myGNSS.getMinute(),
                                 myGNSS.getSecond());

    // SDカードに書き込み
    File logFile = SD.open("log.csv", FILE_WRITE);
    if (logFile) {
      logFile.print(timestamp);
      logFile.print(",");
      logFile.print(myGNSS.getLatitude() /
                                       1e7, 7);
      logFile.print(",");
      logFile.println(myGNSS.getLongitude() /
                                       1e7, 7);
      logFile.close();
      Serial.println("Logged: " +
                           String(timestamp));
    } else {
      Serial.println("Failed to open log.csv");
    }
  }
  delay(1000);
}
```

①LEDピンの設定
②デフォルトとは違うQwiic用I²C通信
③取得データはいったんキャッシュ
④SDカードは頻繁にクローズ
⑤緯度と経度の桁合わせ

これにしたがって，各LEDのピン・モードと初期値(消灯状態)を設定します(**リスト1の①**)．なおパソコン接続時のデバッグ用途として，シリアルにメッセージを出力しています．

● QwiicのI²CはWire1を使う

Qwiicを使用する場合には，I²Cオブジェクトの変数名は，デフォルトの`Wire`ではなく，`Wire1`を使わなければなりません(**リスト1の②**)．Qwiic用のI²CとデフォルトのI²Cは別のものであり，併用できるようになっているためです．

● GPS取得情報はいったんキャッシュする

今回使用するGPS用のArduinoライブラリは，年月日や時刻，緯度・経度を個別の関数呼び出しで取得します．

それぞれの関数の呼び出しタイミングによって，呼び出し前後では既に自分の位置情報が変わっている場合があります．そこでまず`getPVT`関数(**リスト1の③**)を使ってすべての情報を取得し，キャッシュしてから個別の情報取得を行うのが適切です．

● SDカードは頻繁にクローズする

今回の使われ方の特性から，運用中に突然電源が切れてしまうことが考えられます．そのタイミングによってはSDカード上のファイルを壊してしまうことがあるため，頻繁にファイルをクローズするようにします(**リスト1の④**)．これによりデータ書き込み中の電源断のリスクを減らせます．

ただし，これでも完全ではないので，より強固な保護が必要な場合は，ファイルの書き方や，バックアップ方法など，工夫が必要です．

● Googleマップで読み込める形式で保存する

Googleマップには緯度と経度の情報を読み込んで地図上にプロットする機能があります．これを試してみるために，次の形式でファイルに保存するようにします．

時刻，緯度，経度

今回使用するGPSライブラリでは，緯度と経度を10^7倍した整数値で得られるため，逆に10^7で割った値を保存します(**リスト1の⑤**)．

記録したGPS測位データをGoogleマップにプロットする

● 移動記録を見る

今回のシステムを車に乗せて移動してみました．その結果microSDカード上のログ・ファイル(LOG.CSV)には次の情報が記録されていました(緯度と経度の値は，記事掲載用にランダムな数値を加えている)．

```
2025-08-21T17:13:28Z,35.7676421,139.4165106
2025-08-21T17:13:30Z,35.7674271,139.4165780
2025-08-21T17:13:32Z,35.7672267,139.4166903
2025-08-21T17:13:34Z,35.7670265,139.4168112
2025-08-21T17:13:36Z,35.7668222,139.4169307
2025-08-21T17:13:38Z,35.7666226,139.4170507
```

この情報を地図にプロットしてみます．手順は次の通りです．

①ログ・ファイルから不要な部分を削除しておく(GPS衛星を補足できていない先頭付近のデータなど)
②Googleマップ(https://www.google.co.jp/maps)にアクセスする
③左上の横線3本のメニューからマイマップを開く(**図3**)
④[新しい地図を作成]をクリック
⑤[無題のレイヤ]の[インポート]ボタンをクリックし，採取したログ・ファイルを読み込ませる．
⑥プロットするデータを選択する．3つのフィールドのうち，2番目を緯度，3番目を経度とする(**図4**)
⑦マーカのタイトルとして使用する列に，1番目のフィールド(時刻)を選択する

これで地図上に，採取した緯度・経度の点がプロットされます(**図1**)．このままだと少し見づらいので，プロットするアイコンを変えてみるなど，調整してみると良いでしょう．

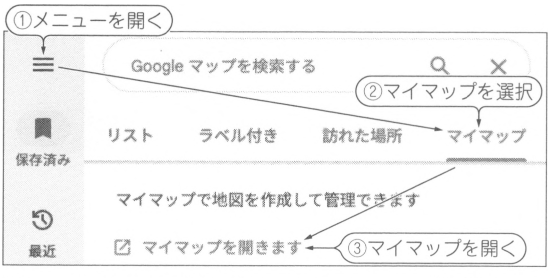


図3　Googleマップにアクセスしてマイマップを開く

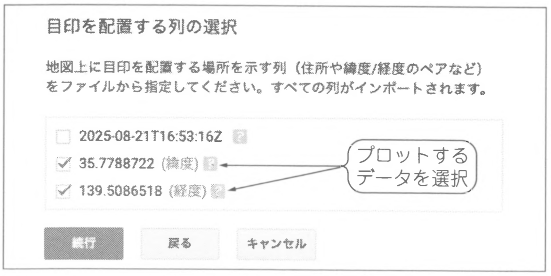
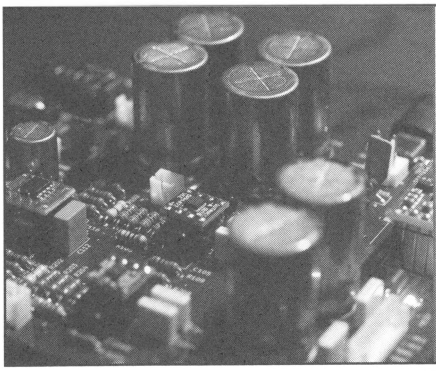


図4　プロットするデータを選択(2番目を緯度，3番目を経度とする)

連載



進化するOPアンプの実力は？差動もシングルも対応！

OPアンプとっかえひっかえ評価！ヘッドホン・アンプ実験ベンチ

第3回　ステレオのLとRをセパレーションする基板のスリットの是否

吉田 誠 Makoto Yoshida

今回は，基板のアートワークとステレオ・セパレーションの関係を調査します．

本連載で製作した「OPアンプとっかえひっかえ評価基板」のGNDにスリットを入れた基板を作成し，スリットの有無によるセパレーションの変化を確認しました．**写真1(a)**にスリットを入れた基板を示します．

基板のアートワークではステレオ信号間の結合を避けるためにスリットを入れたり長穴をあけたり，信号のディレイを調整する等長配線をしたり，特性インピーダンスを合わせるマイクロストリップ・ライン，フィルタを入れたりなど，まるで模様のようなアートを感じさせる文字通りのアートワークを見かけます．

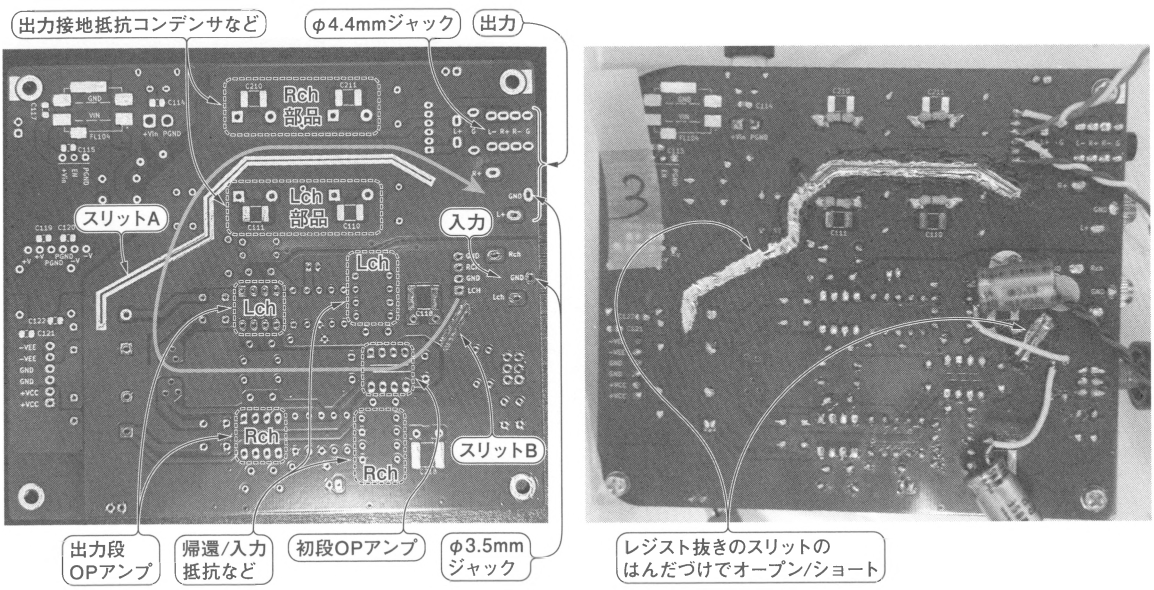
アートワークの重要性は絶縁が要求される高電圧の基板での物理的な空間距離や沿面距離に気を配った配線の場合，比較的わかりやすく納得できます．一方で比較的低電圧のオーディオ機器でもノイズの混入を防いだりステレオ・セパレーションを大きくとったりすることを目的として，回路構成にもましてアートワークにも細心の注意を払って設計します．しかし高電圧の回路に比べるとどうしてそのアートワークになったのかはわかりにくいようです．

ステレオのLchとRchはセパレーションしたい

オーディオではセパレーション(もしくは，クロストーク)の改善のため基板のGNDパターンにスリットを設けることがしばしばみられます．スリットで想定される効果を確認します．

● LchとRchのリターン電流が混ざらないようにする

プリント基板における共通インピーダンスがステレ



(a) 基板　　(b) スリットをオープン/ショート

写真1　パターンのオープン/ショートができるレジスト抜きスリット入り「OPアンプとっかえひっかえ基板」
一見クロストークが改善しそうなスリットの効果を実験するために製作した．パターン幅が比較的狭い区間までスリットを入れている

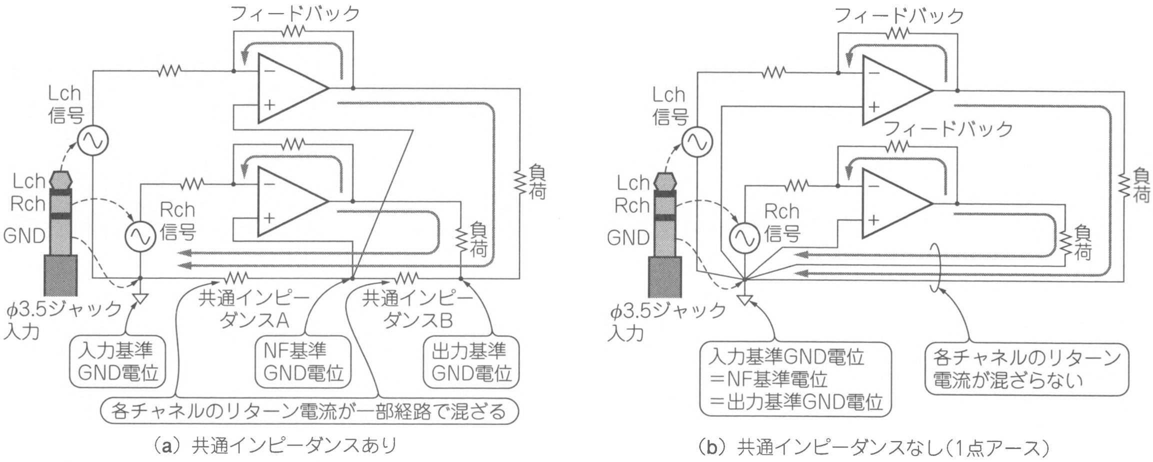


図1　ステレオのLchとRchの信号とそのリターン経路
スリットにより基板パターンを分けることで共通インピーダンスを小さくしてセパレーション改善を狙う．共通インピーダンスに各チャネルのリターン電流が伝わると互いの電位を揺らして影響を及ぼす

オ・セパレーションに与える影響をイメージしてみます．

図1に，ステレオ信号を増幅している回路における，Lch(左)，Rch(右)の信号とそのリターン経路を示します．

● リターン経路の共通インピーダンスが元凶

リターン経路のGNDにインピーダンスがあるとリターン電流による電圧降下が発生します．このときリターン経路のGNDが，Lch，Rchそれぞれの信号のリターン経路に対して共通インピーダンスとして存在すると，各チャネルそれぞれのリターン電流により発生した電圧が混ざり合い，互いの出力に現れます．これがセパレーションの悪化の原因です．

共通インピーダンスをAとBに分けて，もう少し詳しく見ていきます．

図1(a)の共通インピーダンスAでは，本来入力基準GND電位と同じレベルであるはずのネガティブ・フィードバック(以降，NF)基準GND電位が揺らされることで，仮想的なアンプのへの入力信号となり，出力電圧に誤差が生じます．

共通インピーダンスBでは，NF基準GND電位に対して共通インピーダンスBで発生する電位が出力基準GND電位を変動させ，これに負荷両端の電位が足しあわされた電位がアンプから見るとフィードバックされてくるため，誤差が生じます(場合によりNFでの低減効果はある)．

これらの誤差には自身のリターン電流の影響もありますが，特にチャネル間で互いに干渉しあうとセパレーションを悪化させます．

● チャネル間を離して容量結合を減らす

このほかチャネル間の容量結合によるリークなどで特にオーディオ帯域の中でも10 kHzなど比較的高い周波数でセパレーションが悪化することがあります．

このため信号経路のループは大きくならないように配慮しつつ，さらにできるだけチャネル間を離すことが鉄則です．

スリットの効果を確認する実験

いよいよスリットが本当に役立っているのかを確認していきます．

● スリット2つをオープン/ショートする

図2(a)に示すように，基板にはAとBの2つのスリットがあります．これらのスリットは一見左右の回路のリターン経路を分離していてセパレーション改善に役立ちそうです．

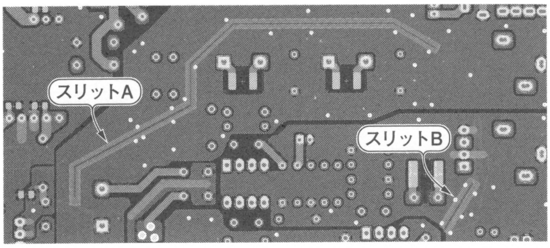
基板の各スリット部はレジストをかけない状態にしており，あとからはんだこてでショートしたりオープンにしたりできるように製作しました．

スリットA，スリットBのそれぞれをショートしたとき，オープンにしたときの4通りの組み合わせで，クロストークにどのような性能変化がみられるか確認しました．

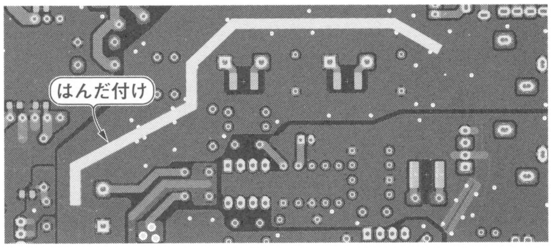
● 測定方法

測定は，信号源にオーディオ・アナライザVP-7722A(パナソニック)，計測にはCosmos ADC(E1DA社)を使いました．

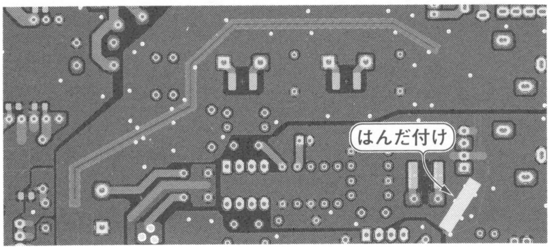
測定結果はわずか1 dB程度の差の値を計測しているため小さくない誤差を含んでいる可能性があることを前置きしておかなければなりませんが，とはいえできるだけ下記のように慎重に測定しました．



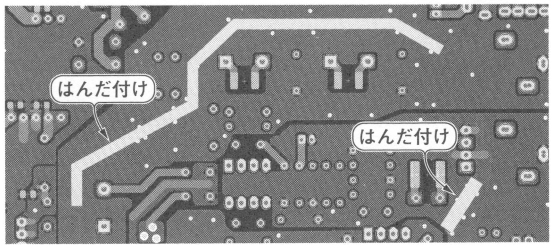
(a) ショートなし(State1)



(b) スリットAをショート(State2)



(c) スリットBをショート(State3)



(d) スリットA+スリットBをショート(State4)

図2　プリント基板に設けた2つのスリットAとBをオープンまたはショートしてクロストークを確認した

▶値が変動する原因になりかねないボリュームはバイパス

実験中ボリューム位置を最大として測定していましたが，ボリュームに少しでも触れるとクロストークの値が変化することが分かったため，**写真2**(**a**)のようにボリューム回路をバイパスした状態で実験を行いました.

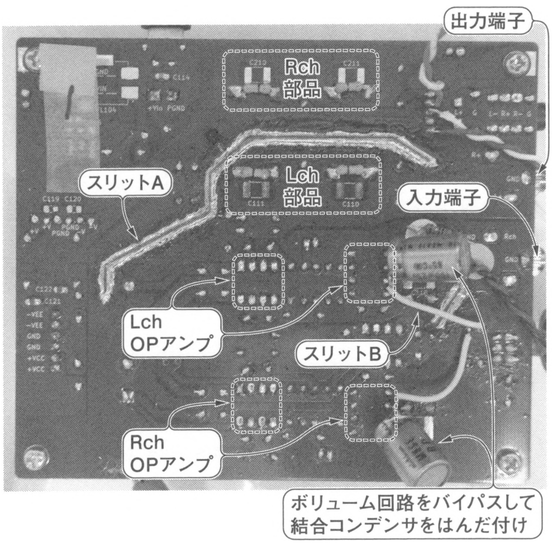
プレ測定したところその差は1 dB，2 dBの微小な変化で環境の影響を受けやすいため，測定ケーブルの位置を**写真2**(**b**)のようにテープ固定して行いました.

▶値が安定する3分以上経ってから測定

測定は基板に電源を投入した直後は値が変動するため安定するまで3分以上待ってから測定しました.

▶スリット間のはんだくずを徹底除去

基板のスリットにはんだくずがついていると正しい測定ができないため，スリットをオープンにするときは基板のスリットのある面と反対から強力なLEDライトで照らして確認しました．それでもスリット間隔が狭く測定にずいぶん苦労し何度かやり直しました．次の機会に同様の実験をするときは，もう少しスリット間隔をあけたいと思います.



(a) 回路基板



(b) ケーブルは固定

写真2　ボリュームをバイパスしたクロストークの測定

1 dB，2 dBの差での測定は環境の影響を受けやすい．ケーブルの位置をテープで固定して測定を行った

状態	Lch信号レベル［dB］	Rch信号レベル［dB］	クロストーク［dB］	スリットA/Bの状態
State1	5.94	−76.37	−82.31	
State2	5.94	−77.45	−83.39	
State3	5.94	−75.69	−81.63	
State4	5.94	−76.92	−82.86	

※測定条件
- CH1(Lch) 1 kHz 1 V_{RMS}信号入力
- CH2(Rch) 20 Ωにて終端
- Cosmos ADC DIP SW 設定　3.7 V_{RMS}

（a）クロストーク実測値



（b）スリットA/Bの状態

図3　4種類スリットごとのクロストークの値
微小な差ではあるが最もクロストークが少なかったのは，スリットAをすべてショートし，スリットBをオープンにした場合．組み合わせ条件によりクロストークは変化しアートワークの難しさが見える結果となった

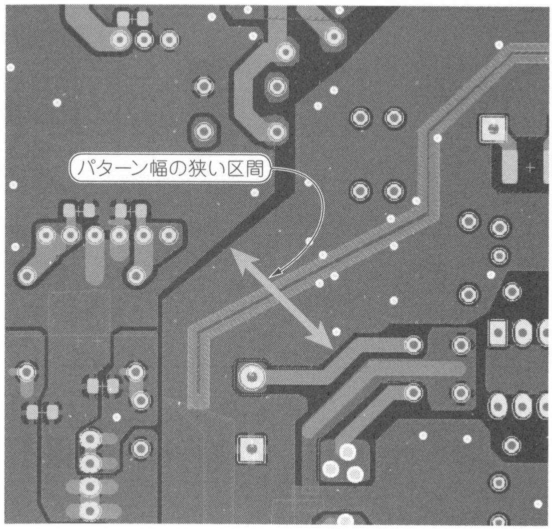


図4　パターン幅の狭い部分でのスリット
スリットを入れるパターンが細い場合は銅箔の面積が削減されるためインピーダンスは上がる傾向にある

実験結果

どのような場合でもスリットを入れた方がクロストークは低くなるのかと思っていましたが，結果はそう単純なものではありませんでした．

図3にそれぞれの測定結果を示します．

● スリットを入れれば良いわけではなかった

全測定結果の中で特に特徴的なのは，すべてのスリットを埋めてベタGNDに近くしたState4よりも，入力側スリットBをオープンにして，出力端子側はスリットAをショートさせたState2の方がクロストークの値は小さくなったことと，スリットBがオープンのとき，ショートのとき共に出力側のスリットAをオープンにするとクロストークが悪化することです．

このことから推察されることは，この基板においては大電流が流れる部分ではスリットを設けるよりもパターン幅を太くしてインピーダンスを下げる方が効果的のようです．スリットBは効果的に機能していそうです．

● パターンが細いとスリットが逆効果に?!

図4はスリットA部のパターンが細くなる部分の銅箔を拡大したようすです．部品配置と配線の関係でくびれがあり，そこまでスリットが伸びています．

この基板では，このような細い部分にスリットが入ることでインピーダンスが上がり，かえってクロストークを大きくしていることが考えられます．

● 実験結果からスリットが有効な場合を推測

以上の結果から推察されることは，スリットは有効ではあるものの，パターンのインピーダンスを下げてしまうと逆効果になる場合もあるということです．特に出力の大きな回路電流が流れるパターンでは注意が必要で，状況によりスリットを入れない方がよい場合もあるということが言えそうです．

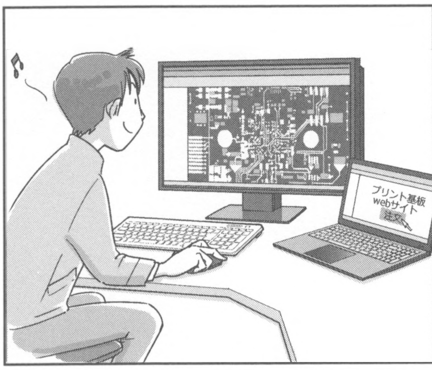
今回，負荷32 Ωを接続した状態で2 V_{RMS}の電圧を出力して測定しているため，出力端子付近は出力のリターン電流が流れていることも関係したと推察されます．

ただし，現実の設計では大電流部分に電流分布を考えながらスリットを入れてノイズ低減を実現している方も見かけますので，大電流部分のスリットが有害というわけではないことを補足しておきます．

＊　＊　＊

今回の測定結果はわずかな変化をとらえる実験であったため誤差を含んでいる可能性はあり，今後も厳密な計測で再度確認していく必要があります．

配線パターンが置かれている周囲の条件により，スリットなどの手法が有効であったり逆効果であったりします．アートワークは大変奥深いものです．



理解が近道！ 信号設計から電源ノイズまで

回路動作から設計するプリント基板入門

第18回 最終回 Sパラメータを生かした高周波シミュレーション回路設計

柿本 哲也 Tetsuya Kakimoto

今回は，基板設計において，知っておきたいSパラメータの意味や役割について解説しておきます．

高周波設計でSパラメータを使うメリット

● コネクタを含めた伝送特性シミュレーションが必要

Sパラメータを理解するために，時間軸シミュレーション（SPICEシミュレーション）とSパラメータのシミュレーションの違いについて図1にまとめてみました．

この例では，基板上の伝送線路と，基板同士を繋ぐコネクタのシミュレーション・モデルが必要です．

● Sパラメータを使った高周波シミュレーションは実測特性を取り込みやすい

コネクタのシミュレーション・モデルは，実測または電磁界シミュレータの結果から作ります．

Sパラメータのモデルは，実測やシミュレーションによる数値結果をそのまま使うだけです．それに対してSPICEのモデルでは，実測やシミュレーションから得られた特性をR，L，Cなどの回路で表現しなければならないので，逆に難しくなります．

このような理由もあって，周波数が高くなるとSPICEシミュレーションはやっていられない，となっていきます．なお，オリジナルSPICEや，それに類するLTspice等では無理ですが，Sパラメータをミックスして SPICEシミュレーションができるツールもあります．

基板設計時にSパラメータで知っておきたいこと

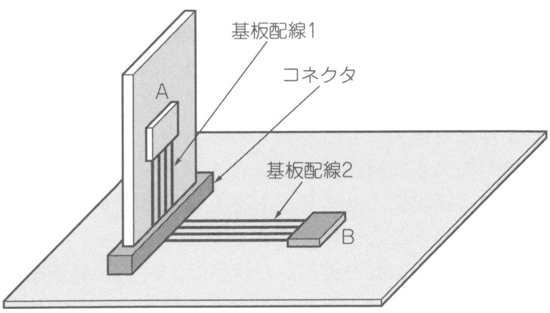
基板設計のレベルでSパラメータについて知っておいて欲しいことを挙げていきます．

● 通常は50Ω基準の値

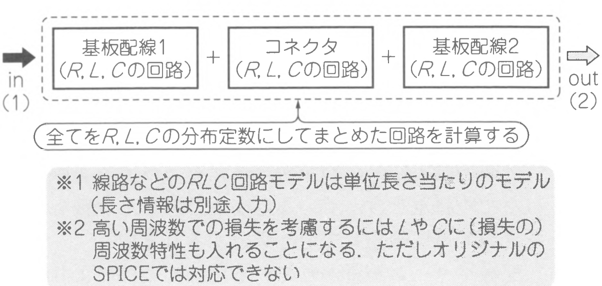
Sパラメータは，特に断りが無い限り，高周波用測定で一般的なインピーダンスである50Ωを基準とし，その基準インピーダンス（50Ω）に対しての比率となります（一部で75Ω系もあります）．

● 電気長で考える

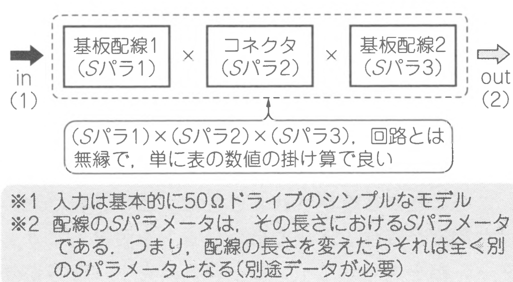
Sパラメータでは（実はSPICEでも），信号伝送やノ



（a）シミュレーション対象：コネクタで繋がった2枚の基板の伝送特性



（b）SPICEなどの時間軸信号波形のシミュレーション



（c）Sパラメータを使った周波数特性のシミュレーション

図1 一般的な回路シミュレーション（時間軸）とSパラメータを使ったシミュレーションの比較

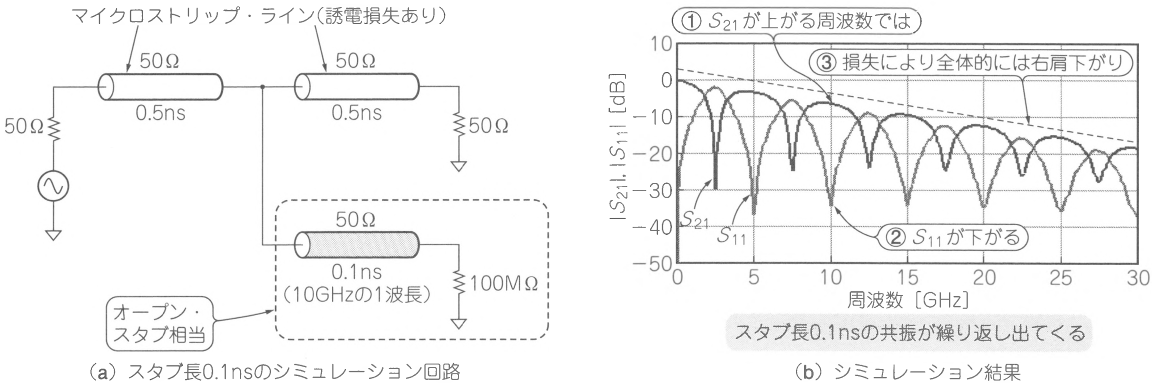


図2　短い分岐(スタブ)のS_{11}, S_{21}特性
uSimmics(旧名QucsStudio)によるシミュレーション例

イズを考えるときは，電気長で考えるのが基本です．物理的長さ(見た目の長さ)は，信号や放射ノイズを考える上では，ほとんど意味がありません．

絶対的な基準は信号の波長です．電気信号の伝わる速度が決まれば時間に換算できます．信号の伝わる速度(と時間)は条件(基板設計の世界では主に誘電率)によって変わります．

時間軸から全く離れたSパラメータなのに「時間で考える」というのも言っていて違和感はありますが，信号がどこまで進んだかが問題になるので，それが結果的に時間で示される，というだけです．

その時間は，信号波長に対してどのくらいの距離または位相なのかがポイントです．周波数軸の世界なので，物理的な長さのイメージを捨てて考えるようにしたいところです．

● S_{11}とS_{21}は基本的には入れ子の関係

単純な物理法則として，途中の損失が無い場合は，

入力エネルギー＝反射エネルギー＋透過エネルギー

です．その理屈から直感的にも理解できると思いますが，S_{11}とS_{21}は基本的には入れ子の関係です．S_{11}が1に近付いたら，S_{21}は小さくなります．逆に，S_{21}が1に近いときはS_{11}は小さくなります．

適切な例かどうかは分かりませんが，具体的な例としてオープン・スタブのシミュレーション結果を**図2**に挙げておきます．オープン・スタブは，実物に当てはめるなら，コネクタのピンの不要部分が一番イメージしやすいと思います．

● 単純素子LやCのSパラメータ

単純なLやCのSパラメータを**図3**に示しておきます．フリーのSパラメータ対応シミュレーション・ツールuSimmics(QucsStudioから改名)のシミュレーション結果です．

おそらく，かなり多くの人が，C並列のS_{11}やL並列のS_{11}について，なんで？と感じると思います．これらはマイナスの反射です．慣れないと，かなり難しいと思います．私もどうにかこうにか納得しているレベルで，分からない人に分かるように伝えられるほどではないので，説明するのはやめておきます．そういうものだ，と無理やりにでも理屈を覚えておき，良い機会と題材に出会ったときに感覚と理屈をすり合わせましょう．このような直感的でないところが，高周波やSパラメータの難しい部分だと思います．

Sパラメータのメリット…実測できる

● 測定にはネットワーク・アナライザを使う

Sパラメータを測れる測定器がネットワーク・アナライザです．オシロスコープのように「何も分からないけど，とにかく触れば分かるだろう」みたいな部分はありません．原理も実際の測定も難しく，Sパラメータを全く知らないのでは話になりません．Sパラメータをある程度分かって初めて分かる測定器です．

オシロスコープを使ってインピーダンスを測定するTDR(Time Domain Reflectometry，時間領域反射測定)は，ステップ・パルスの時間応答を見て，測定対象の伝送線路に何があるかを推測する用途に使います．

それに対してネットワーク・アナライザで測るSパラメータの測定は，50Ω入力に対する周波数応答を見て，向こう側に何があるかを推測することになります．

ネットワーク・アナライザの測定結果であるSパラメータは，TDRのような単純かつ直感的なイメージで何とかなるほど簡単ではありません．その測定結果に対するイメージが持てるまでには，前々回，前回と説明してきたような，知っておくべきことが結構あります．

● SパラメータはTSF(Touchstone format，タッチストーン形式)が業界標準

数値表であるSパラメータは，業界標準規格でタッ

第4回　ディジタル信号シミュレーションに使う「IBISモデル」とは(2024年9月号)
第5回　I/O信号モデルIBISの中身を読み解く(2024年10月号)
第6回　配線インピーダンスと配線遅延(2024年12月号)

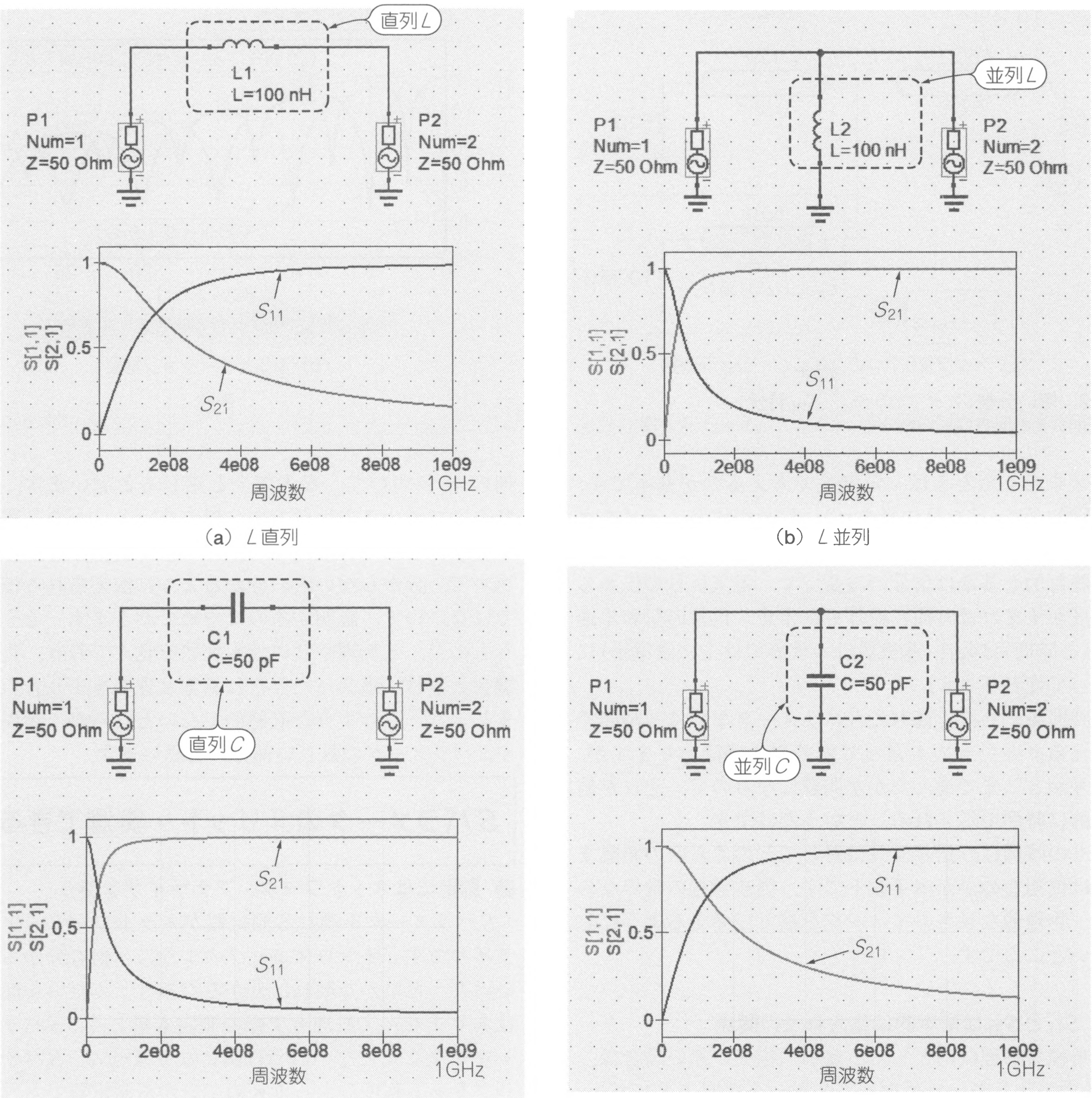


図3 LC素子のSパラメータ
uSimmics(旧名QucsStudio)によるシミュレーション例

チストーン・フォーマットで書かれたものになります．書き順や項目が指定された周波数と比率の表です．Sパラメータでの測定結果やシミュレーション・データは，デフォルトこの形式です．

実際に設計するときに使うSパラメータの実例を**リスト1**に示します．村田製作所から**図4**のように入手できる，1005サイズの積層セラミック・コンデンサのSパラメータの一部です．行頭の！はコメントを表す記号です．

● スミス・チャートに慣れてからが良いかも？

Sパラメータについて知っていくとスミス・チャートの話も出てくるでしょう．知っておくとより良いのですが，基板や伝送線路の周波数特性を見るだけなら不要です．ネットワーク・アナライザでSパラメータの測定をする場合には必須になると思います．

● ZパラメータとYパラメータはとりあえず無視

Sパラメータと似たものとして，ZパラメータやYパラメータがあり，これらの仲間とされることがあるようなのですが，一緒にしてよいのかは微妙なところです．

ZパラメータやYパラメータをイメージしようとすると，物理現象と結びついているSパラメータの理解からは外れていくと思うので，個人的な考えでは，初心者であれば全く別物として扱うことをお勧めします．

リスト1　セラミック・コンデンサのSパラメータ…メーカから入手できることもある

Sパラメータ対応のシミュレータで読み込めるタッチストーン・フォーマットのデータで提供されている

```
! Murata Part Number: GRM1552C1H271JA01
! These Parameters are Measured in Series Mode Connection
!            o--||--o
! Port1                  Port2
!            o------o
! Operation Temp=20[degC], DC Bias Voltage=0[V]
! Freq. Start=100[MHz] Stop=8.5[GHz], 401[Steps]
! Data Generated on Jan 10, 2017
# Hz S RI R 50
```

! Freq.(Hz)	S11(Real)	S11(Imag)	S21(Real)	S21(Imag)	S12(Real)	S12(Imag)	S22(Real)	S22(Imag)
1.00E+08	0.004037	-0.056181	0.995963	0.056181	0.995963	0.056181	0.004037	-0.056181
1.21E+08	0.002955	-0.045530	0.997045	0.045530	0.997045	0.045530	0.002955	-0.045530
1.42E+08	0.002322	-0.037857	0.997678	0.037857	0.997678	0.037857	0.002322	-0.037857
1.63E+08	0.001923	-0.032018	0.998077	0.032018	0.998077	0.032018	0.001923	-0.032018
1.84E+08	0.001660	-0.027390	0.998340	0.027390	0.998340	0.027390	0.001660	-0.027390
2.05E+08	0.001479	-0.023600	0.998521	0.023600	0.998521	0.023600	0.001479	-0.023600
2.26E+08	0.001354	-0.020417	0.998646	0.020417	0.998646	0.020417	0.001354	-0.020417
2.47E+08	0.001265	-0.017686	0.998735	0.017686	0.998735	0.017686	0.001265	-0.017686
2.68E+08	0.001203	-0.015301	0.998797	0.015301	0.998797	0.015301	0.001203	-0.015301
2.89E+08	0.001161	-0.013187	0.998839	0.013187	0.998839	0.013187	0.001161	-0.013187
3.10E+08	0.001134	-0.011288	0.998866	0.011288	0.998866	0.011288	0.001134	-0.011288
3.31E+08	0.001118	-0.009565	0.998882	0.009565	0.998882	0.009565	0.001118	-0.009565

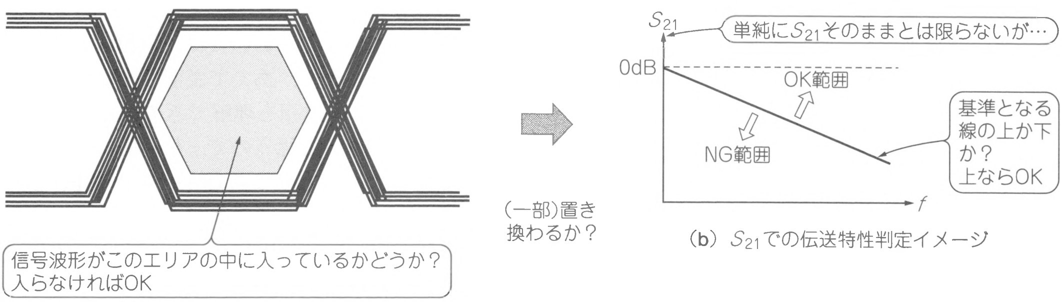
コンデンサの直列のSパラメータであることが表記されている．並列は当然全く別物．

50Ω基準

周波数　S_{11}　S_{21}



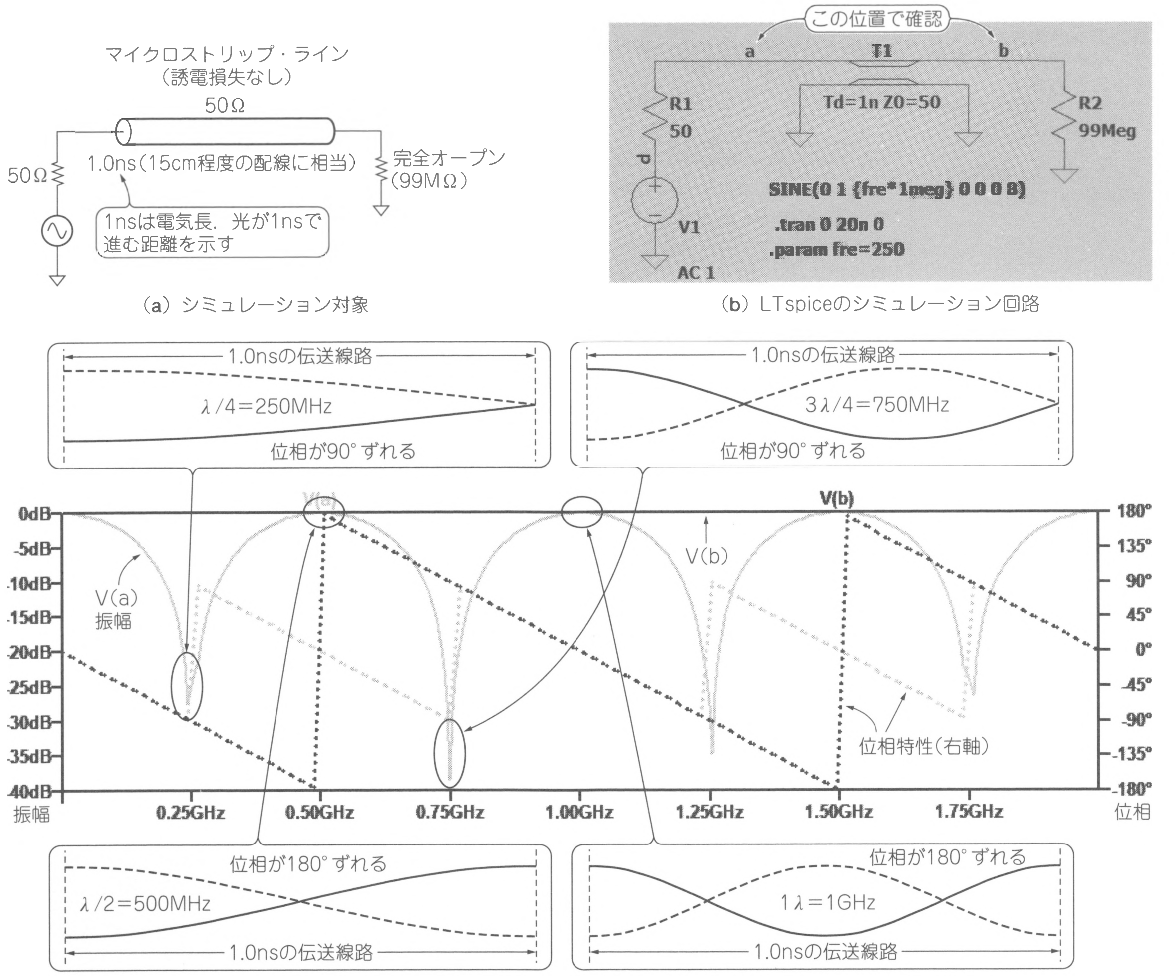
図4　コンデンサ・メーカなどはオンラインでSパラメータを提供している



(a) アイ・パターンでの特性判定イメージ

(b) S_{21}での伝送特性判定イメージ

図5　信号伝送特性の判定も将来的にはSパラメータになるかも？



(a) シミュレーション対象

(b) LTspiceのシミュレーション回路

(c) シミュレーションで求めた周波数特性

図6　伝送線路の位相のようすをシミュレーションで確認
位相特性は−180〜180°を上下するだけ

興味のある方は参考文献(1)を参照してみてください．

● 信号伝送の良否判定はアイ・パターンから*S*パラメータ測定結果に置き換わるかもしれない？

信号の良否がアイ・パターンで規定されるような通信規格などは，全部ではないでしょうが，*S*パラメータによる規定に置き換わる規格も増えていくと思います(**図5**)．

信号の伝送ということでいえば，表現が異なるだけで，本質は同じです．周波数が高くなると，時間軸での測定やシミュレーションがどこまで通用するか疑問です．特性が確認ができれば良いので，楽で簡単な(ネットワーク・アナライザで測るだけの)*S*パラメータのほうが選択されていくはずです．

信号の位相と*S*パラメータの関係

● *S*パラメータには位相もある

ここまで触れていなかったのですが，*S*パラメータには位相があります．*S*パラメータについてちょっと知っておきたい，くらいの人に，位相の話まですると理解不能になるので，あえて説明しませんでした．

*S*パラメータの位相を理解できていなくても，使ううちに何とかなると思うので，積極的には説明しません．まずは，大事なところ(S_{11}，S_{21}と共振)を抑えてもらうことが絶対かつ最優先です．

● 時間ずれが位相のずれとして現われる

余力と興味のある人向けに，*S*パラメータの位相の話をちょっとだけしておきます．さすがに*S*パラメー

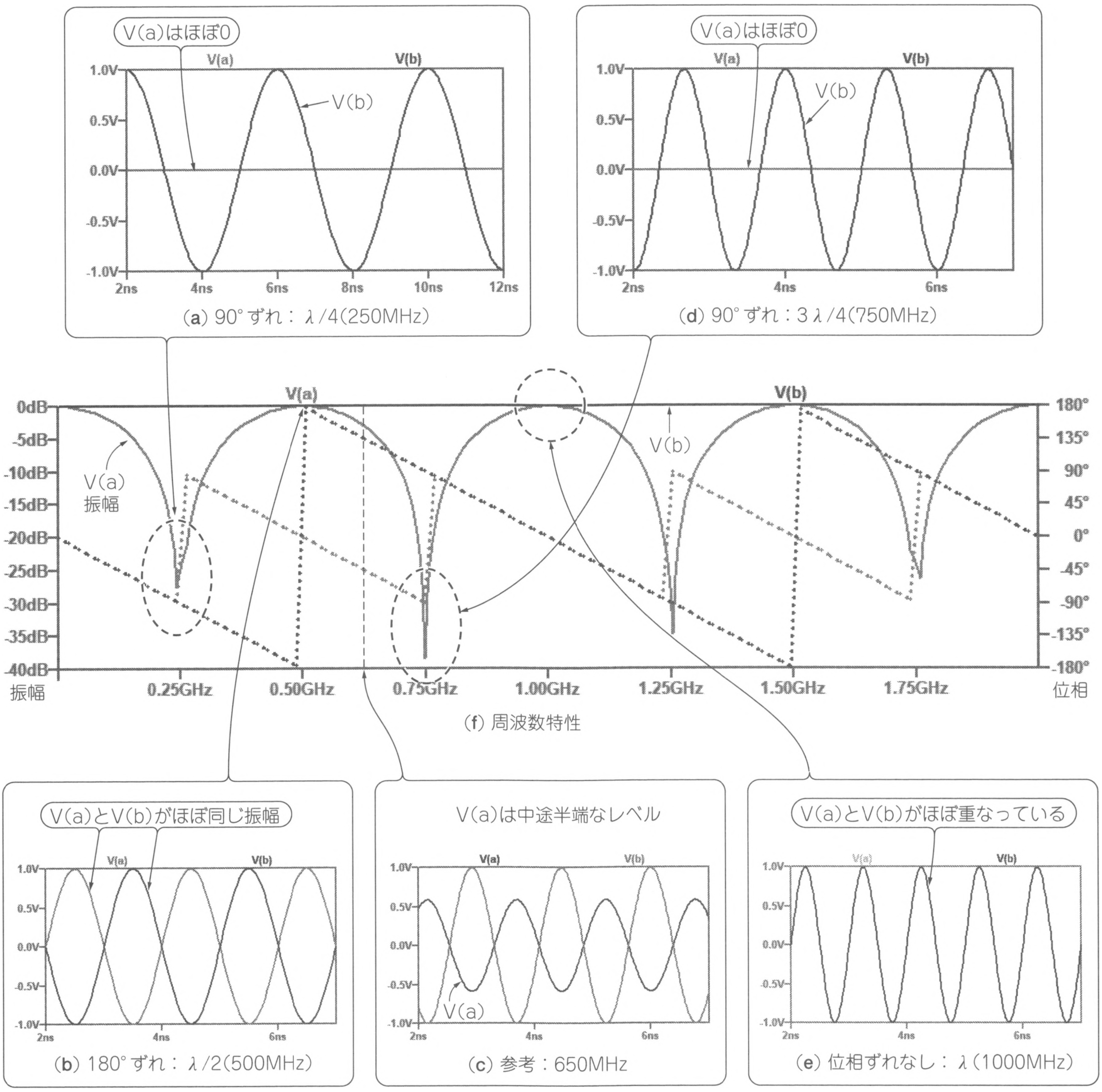


図7　伝送線路の位相による振幅の違いを正弦波で確認

タ理解のためには，全く無視というわけにはいきません．直感的に分かりそうな内容だけ説明します．

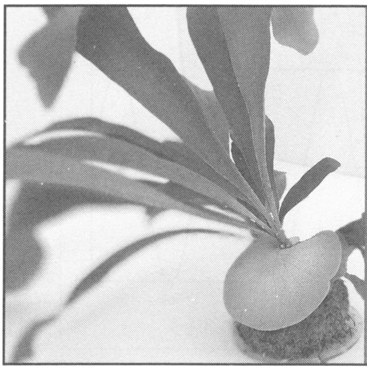
*S*パラメータはinとoutの比です．ただ，反射も透過も時間0(ゼロ)で起こるわけではなく，時間的ずれがあります．*S*パラメータでは，時間的なずれは(基本は)そのまま表現できず，位相で表現することになります．周波数特性なので，その相対的な位置関係だけしか見ません．絶対的な時間のずれは気にしません．

具体例をLTspiceで確認してみたのが**図6**，**図7**です．

図2のオープン・スタブもそうなのですが，紙に書かれた結果を見るだけで理解できるのは，よほど才能と適正のある人だけだと思います．本気で理解しようとするのであれば，実際にシミュレータを動かして，*S*パラメータがどのようなものなのか体験することをお勧めします．

◆参考文献◆

(1) 天川 修平；*S*パラ再入門
https://home.hiroshima-u.ac.jp/amakawa/files/amakawa_S-parameter_20180528_1.pdf



Arduinoからはじめて M5Stamp制御までレベルアップ！

苔玉ニョキニョキ育て！コウモリラン水分モニタ栽培実験

後編　水分量センサの実測テスト＆切手マイコン M5Stampモニタ

砂川 寛行 Hiroyuki Sunagawa

コウモリラン(ビカクシダ)は，最近ホームセンタの屋内ガーデン・コーナなどでよく見かける，シダ植物の一種です．大きくせり出した葉の姿は，インテリアとしても人気があり，木板に張り付けたり，苔玉に仕立てたりするDIYも盛んに行われています．

本稿では，コウモリランの育成環境をモニタリングする実験を行っています．前編では苔玉の水分量を可視化できるようにしました．しかし水分量センサがどれくらい水分量を測れるのか今ひとつ不確かなため，後編ではまず重量ロガーを製作して水分量測定を行い，水分量センサの使い方を考察します(製作ギア3，**写真1**)．さらに発展させて，温度・湿度などの環境センサも追加し，最終的に切手サイズ・マイコン・モジュールM5Stamp＆円形LCDを使ってモニタできるようにしました(製作ギア4)．

苔玉の水分量を正確に知る…給水＆乾燥重量の測定

● 目的

苔玉に対して土壌用水分量センサは，どの程度定量的に水分(保水容量)を測定できるのでしょうか．この疑問を明らかにするため，水分量センサの出力電圧と実際の水分量の関係を検証しました．水分量の実測値は，苔玉の重量を測定することで確認しました．

検証には，コウモリランを植え付けていないダミーの苔玉を使用しました．これは，測定のために何度も給水と乾燥を繰り返すことになり，植物にとっては過酷な環境となるため，植物への負担を避けるためです．実際の苔玉とは多少差異が出る可能性はあります．

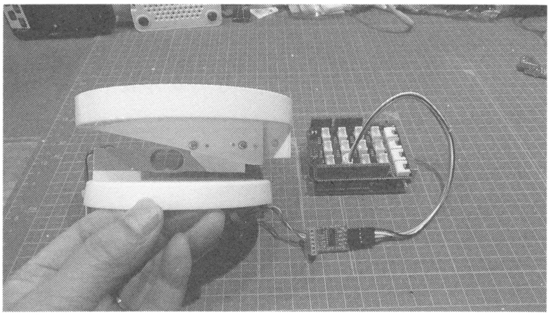
● 重量と水分量と保水率の関係イメージ

製作したダミー苔玉の大きさは直径約65 mmでした．この苔玉の乾燥状態での重さは13g，水を十分に吸わせたときの全体の重さは122.3gで，そこから計算される水分の重さは109.3g程度です．参考として，直径65 mmの完全な水の球体の重量を計算すると約143.72gとなるため，この苔玉の体積に対する保水率は約76%といえます．

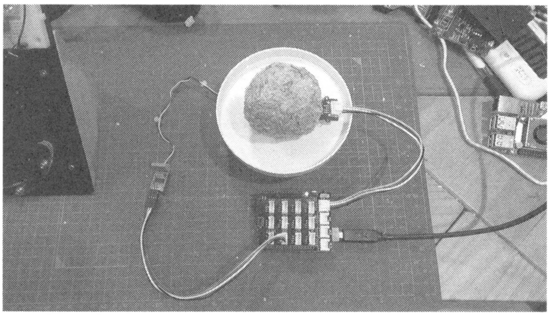
水分量測定用の重量ロガーの製作(ギア3)

苔玉の重量測定には，ロードセルを使用します．ロードセルは重量などで力が加わると抵抗値が変化する素子を利用しています．微細な抵抗変化を専用のICを使用して増幅してマイコンに伝えます．

マイコンはArduino Unoを用いました．ロードセルからの重量データと，同時に測定した水分量センサの出力値を，苔玉が満水状態から完全に乾燥するまで



(a) 重量ロガー本体



(b) 重量ロガーに苔玉(ダミー)を乗せて水分量センサの出力値と重量の関係を調べる

写真1　製作した重量ロガー(図1)を使って苔玉の水分量を測る

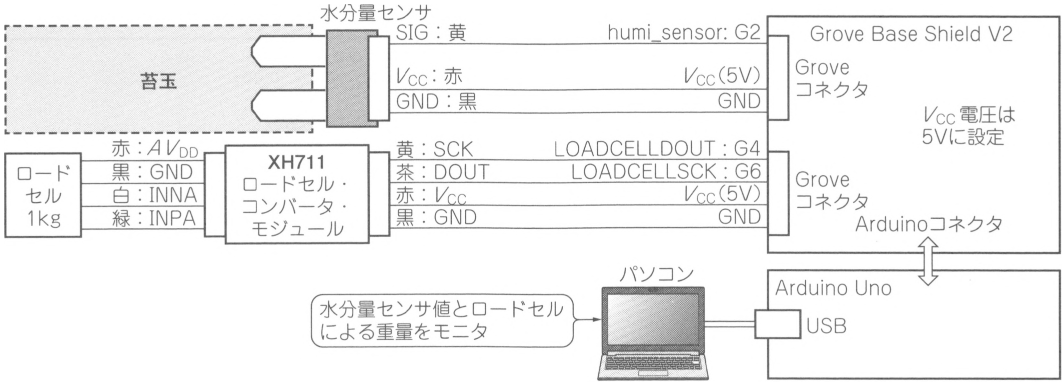


図1　苔玉の水分量を正確に知る…ロードセルとArduino Unoを使った重量ロガーの回路

の間，継続的に記録(ログ)するシステムを構築しました．

この重量ロガーの回路を**図1**に，実験のようすを**写真1**に，使用した部品を**表1**に示します．

重量を量るための1kgロードセルXH711

● ロードセルと筐体

ロードセルは1kg用のものを使用します．XH711というロードセル専用ICを搭載したモジュール基板とセットで，オンライン・ショップ(アマゾンなど)で購入できます．

重量測定ロガーの筐体については，上部の受け皿部分は100円ショップで購入したものを流用し，下部のロードセル固定部分は3Dプリンタで自作しました(アクリル製の筐体がセットになったロードセル・キットも市販されている)．

● ロードセル制御用Arduino Unoプログラム開発環境

Arduino IDEのライブラリ・マネージャにてXH711 Arduino Libraryというライブラリを追加し，これを利用してプログラミングを行いました．

ロードセルおよびXH711を使用するにあたっては，最初にキャリブレーション(校正)作業が必要となります．あらかじめ，正確な重量がわかっている重り(分銅など)を準備しておきます．

水分量測定用の重量ロガーのプログラム

● キャリブレーションについて

キャリブレーションおよび重量測定のプログラムは，XH711ライブラリに含まれるサンプルHX711_basic_example(メニュー：ファイル→スケッチの例→HX711 Arduino Library→HX711_basic_example)を参考に作成しました．

このプログラムを実行すると，ロードセルからの生の読み値がシリアル・モニタに表示されます．シリアル通信のボーレートは57600bpsです．

キャリブレーションの手順は以下の通りです．

(1) ロードセルに何も乗せていない状態で，シリアル・モニタに表示される読み値を確認します．
(2) 重量がわかっている重りをロードセルに乗せ，そのときの読み値を確認します．
(3) 以下の式を用いて補正値(スケール・ファクタ)

表1　重量ロガー(図1)に使用した部品

部　品	型　名	メーカ	値	参考価格［円］	参考購入先	備　考
水分量センサ	Grove-水分センサー	Seeed Studio	−	630	千石電商	同等品多数あり
ロードセル＋A-Dコンバータ基板	ロードセル＋A-Dコンバータ※	KKHMF	1 kg	899	アマゾン	
マイコン	Arduino Uno	Arduino.cc	−	5,500	千石電商	廉価な互換機でも可能
拡張シールド	Grove-Base Shield V2	Seeed Studio	−	730	千石電商	
Groveケーブル	(Grove 4ピン用，ケーブル ロックあり)	Seeed Studio	50 cm	160	千石電商	ロードセルとA-Dコンバータ基板を接続するため使用．数本持っていると便利
皿	−	−	−	100	100円ショップ	苔玉を乗せる用
台座	−	−	−	−	−	3Dプリンタで製作

※：デジタルロードセル重量センサ1KGポータブル電子キッチンスケール＋HX711計量センサーモジュール

リスト1　ロードセルを使った重量測定ロガーのプログラム(Arduino Uno用, 抜粋)

```
// ライブラリ呼び出し
#include "HX711.h"

// ピン定義
const int LOADCELL_DOUT_PIN = 2;
const int LOADCELL_SCK_PIN = 3;
const int MOISTURE_PIN = A0;

// ロードセルオブジェクトの宣言
HX711 scale;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Initializing the scale");
  scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_
                                          PIN);
  scale.set_scale(1810.f);
//  scale.tare();              // reset the scale to 0

}

void loop() {
  int Moisture_val = 0;
  float Moisture_Voltage = 0.00;
  float Weight_val = 0.00;

  // 水分センサの値を読み取り
  Moisture_val = analogRead(MOISTURE_PIN);
  // アナログ値(0-1023)を電圧値(0-5V)に変換
  Moisture_Voltage = 5 * ((float)
                                  Moisture_val/1024);

  // HX711から重量値を取得(10回の測定の平均値)
  Weight_val = scale.get_units(10), 2;
  Weight_val += 90.47;   // オフセット補正値を加算

  // 測定結果をCSV形式でシリアル出力
  Serial.print(",MOISTURE[V],");
  Serial.print(Moisture_Voltage);
  Serial.print(",WEIGHT[g],");
  Serial.println(Weight_val);

  scale.power_down();
  delay(60000);
  scale.power_up();
}
```

を求めます．この値は，使用するロードセルごとに異なります．

補正値
={重りを乗せたときの読み値[(2)の値]
－何も乗せていないときの読み値[(1)の値]}/
重りの重量[g]
＝重りの重量(の読み値)

● 最終的なプログラム

作成した重量測定ロガーのプログラム(一部抜粋)を**リスト1**に示します．scale.set_scale(1810.f);(12行目)のように，上記で求めたロードセルの補正値を設定します．

プログラムでは，水分量センサの電圧値と，ロードセルで測定した重量をCSV(Comma Separated Values)フォーマットでシリアル・ポートに出力するようにしました．この出力情報は，パソコン上でターミナル・ソフトウェア(例：Tera Term)を使用して記録・保存します．

● 長期間連続ログならではの注意点

通常ロードセル・ライブラリにはscale.tare();(現在の荷重を0としてリセットする機能)といった関数があります．今回は長期間の放置測定を想定していて，長期間動かしているときに何らかの原因でマイコンがリセットされた場合(しばしば発生する)，測定対象物の重量が意図せず0にリセットされてしまうのを防ぐため，今回はこの行をあえてコメントアウトして無効化しています．

代わりに，初期状態での大きなずれは，プログラム内で固定値をオフセットとして補正するようにしています．scale.tare()を実行しない場合，測定値が数グラム程度，時間とともにドリフト(変動)してしまうことがありますが，今回は無人での連続記録ができることを優先し，この点は目をつむることにしました．

水分量センサの使い方…重量による水分量測定結果の考察

今回のダミー苔玉(直径約65 mm)が，水分満タンの状態からほぼ0になるまでには，1週間程度の時間が必要でした(ただし，今回の測定では乾燥時間を短縮するためにUSBファンで送風した，それでも3日程度かかった)．

測定結果を**図2**に示します．この結果から，以下のことが明らかになりました．

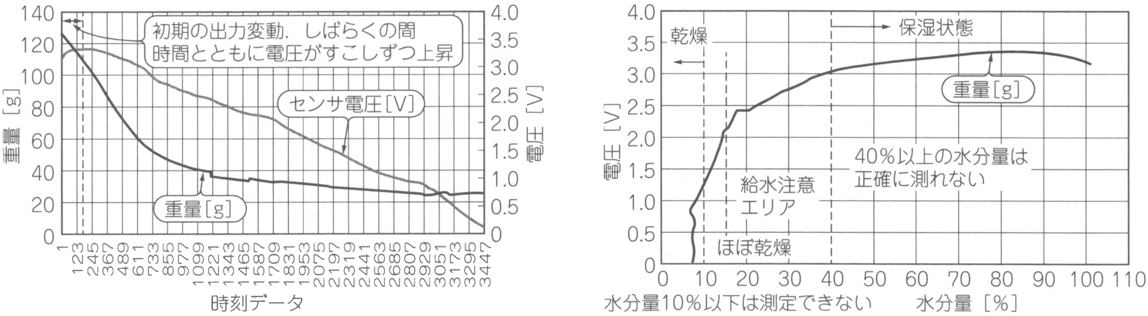
● 保水率40 %以上…水分量が多い場合は抵抗値方式はNG

苔玉の水分量が比較的多い，保水率約40%以上の範囲においては，抵抗値方式の水分量センサの出力電圧は大きな変化を示さず，ほぼ一定の値となりました．電源の再投入など，条件によっては電圧が予期せず変動する可能性もあり，この範囲では定量的な水分量の把握は難しそうです．

● 保水率40 %以下…水分量が少ない場合はOK

水分量が少なくなり，保水率約40%を下回って乾燥が進んでくると，センサの出力電圧は急激に低下していく傾向が見られました．

この結果から，抵抗値方式の水分量センサは，苔玉



（a）重さと水分量センサの変化

（b）実水分量と水分量センサ出力の関係

図2　水分満タン→乾燥…重量による水分量測定結果
抵抗値方式と容量方式の使える範囲を考察する

の水分がかなり少なくなり，多少乾燥が進んだ状態（もうすぐ水切れを起こすようなタイミング）にならないと，明確な出力変化を示さないことがわかりました．

● 静電容量式センサの課題について

今回，同様の検証を静電容量式の土壌水分量センサでも試みましたが，水分が満タンの状態から乾燥して0になるまで，センサの出力電圧にほとんど変化が見られないという結果になりました．

この原因として，苔玉が乾燥する過程で収縮し，センサの電極表面に苔が密着したままの状態が維持されるため，センサ周囲の静電容量が変化しにくかったのではないかと考えられます．実際に，一度センサを苔玉から引き抜き，挿し直すと，正常に水分がない（乾燥している）ことを検知しました．この現象には再現性があり，苔玉の水分量検知において，少なくとも今回試した静電容量式センサは用途に不向きと判断し，使用しないことにしました．

● 抵抗値方式センサの長期利用について

今回主に使用した抵抗値検出方式のセンサでは，電極表面が苔玉に直接触れて露出しています．電子工作として短期間楽しむ分には問題ありませんが，長期間にわたって使用し続けると，電極部分が腐食し，いずれは正確な測定ができなくなるか，あるいは故障してしまう可能性があります．ただし，センサ自体は比較的安価であるため，消耗品として割り切って定期的に交換するという考え方もあります．

切手サイズ・マイコンM5Stamp×丸形LCDコウモリラン育成モニタの製作（ギア4）

● 方針

一般的な抵抗値方式や静電容量方式の土壌水分量センサでは，苔玉の水分量をリニア（線形的）に，かつ正確に検出するのは難しいことがわかりました．しかし，ロードセルを使用して苔玉全体の重量を測定すれば，蒸発による水分量の変化を直接的にリニアに把握できます．

この結果を踏まえ，水分量を測るためにロードセルを組み込んだ専用のコウモリラン・スタンドを製作します．重量から推定されるより信頼性の高い水分量，そして気温や湿度といった環境センサの数値を総合的に判断し，コウモリランの現在のコンディションを液晶画面に表示します．

● ハードウェア構成

マイコンには切手サイズの超小型モジュールM5StampS3を使用しました．オンライン通販で，1500円強で入手できます（後継品M5StampS3A）．240 MHz動作でWi-Fi付きのESP32-S3FN8を搭載しています．

筆者は，この超小型マイコンM5StampS3と円形の小型液晶ディスプレイを組み合わせて，M5StampS3液晶モジュールとして製作しました．回路全体を**図3**に，使用した部品を**表2**に示します．

完成したコウモリラン育成モニタを**写真2**に示します．

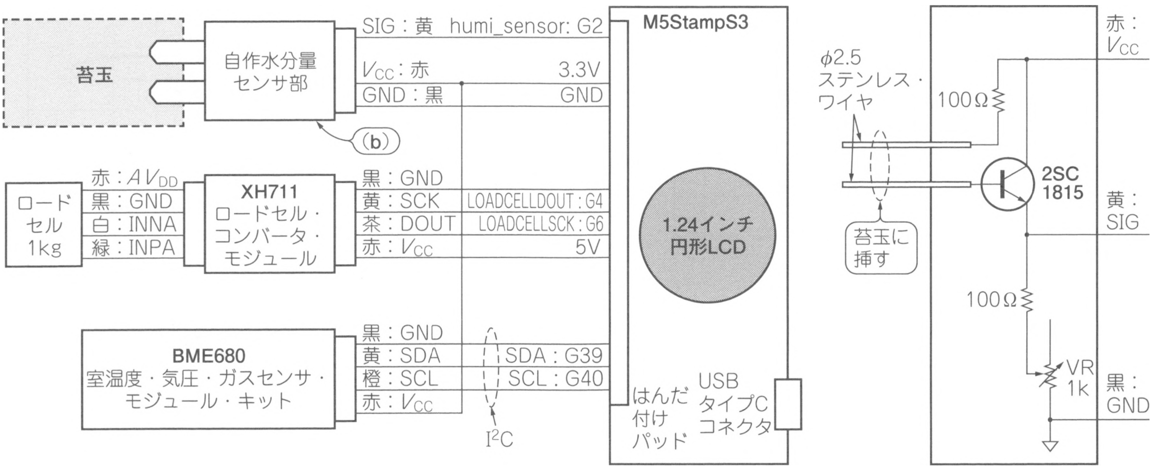
重量から推定した水分量，環境センサ（BME680）で測定した温度，湿度，気圧を円形の液晶ディスプレイ（LCD）に数値で表示するとともに，これらの測定結果に基づいてコウモリランのコンディション（機嫌）を表すイラストを切り替えて表示するようにしました．

スタンドの筐体は3D CADで設計し（**図4**），3Dプリンタで出力しました．

円形LCDに表示するコウモリランのイラストはChatGPT（画像生成AI）を利用して生成しました（**図5**）．

● ちなみに別バージョンも作ってしまった

写真3は，別バージョンとして製作したコウモリラン・スタンドです．こちらでは，NeoPixelリングLEDを下部スタンドに内蔵し，光の輪とその光に照らされたコウモリランが，あたかも宙に浮いているように見えるデザインを試みました．



(a) 本体　　(b) 自作水分量センサ部

図3　切手サイズ・マイコンM5Stamp×丸形LCDコウモリラン育成モニタの回路

表2　コウモリラン育成モニタ(図3)に使用した部品

部位	部品	型名	メーカ	値	参考価格[円]	参考購入先	備考
メイン部	ロードセル	SC616C-1kg	※4	1 kg	650	秋月電子通商	
	ロードセル用A-Dコンバータ	HX711モジュール	KKHMF	−	670	アマゾン	3個セットの価格
	環境センサー	BME680使用 温湿度・気圧・ガスセンサーモジュールキット	秋月電子通商	−	2,480	秋月電子通商	
	液晶付きマイコン	M5Stampラウンド液晶モジュール (M5StampS3実装済み)	ウルカテクノロジー	−	5,180	スイッチサイエンス	1.28インチ丸型液晶とM5StampS3を合体させたマイコン・モジュール
	ユニバーサル基板	M5Stack用プロトモジュール[M001]	M5Stack	−	825	スイッチサイエンス	ユニバーサル基板として使用．後にM5Stackシリーズの各モジュールとの接続を想定
自作水分量センサ部	抵抗(R_1, R_2)	CF16J100RB	※1	100 Ω	120	秋月電子通商	100個入りパック
	トランジスタ	2SC1815	※2		100	秋月電子通商	20個入りパック
	半固定抵抗	TSR-3323S-102R	※3	10 kΩ	40	秋月電子通商	
	ワイヤ5 cm程度2本	−	−	φ 2.5	800	ホームセンタやアマゾンなど	ステンレス・ワイヤは非常に硬く切断するのが大変で怪我の恐れもあるので，短期間の使用であればアルミ・ワイヤも検討

※1：FAITHFUL LINK INDUSTRIAL　※3：SUNTAN TECHNOLOGY
※2：Jiangsu Changjiang Electronics Technology(JCET/長電科技)　※4：Sensor and Control

コウモリラン環境モニタに使用するセンサあれこれ

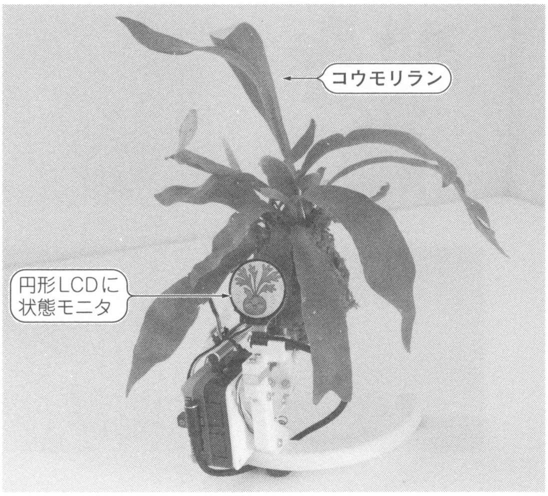
● 水分量センサ(抵抗式を自作)

既存の市販品では電極部分が苔玉に挿しにくい場合があるため，ワイヤ形状のものを自作しました．この自作センサは，主に苔玉が完全に乾燥したことを検知するための補助的な役割を担います．電極部には，苔玉を物理的に保持するホルダとしての機能ももたせています．電極の材質には，腐食しにくいステンレスを採用しました．検出回路はトランジスタのエミッタ・フォロア回路で自作しています．

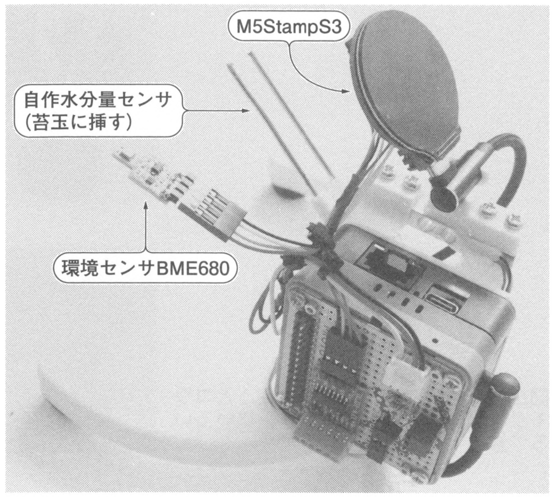
● 水分量用の重量センサ(コウモリラン・スタンド筐体の一部として使用)

苔玉を保持するホルダ(水分量センサ電極)をロードセルの負荷検出側で支え，反対側をスタンド本体に固定しています．この様な構成にすることでコウモリラン・苔玉・水分量センサを含めた重量を計測できるようにしました．

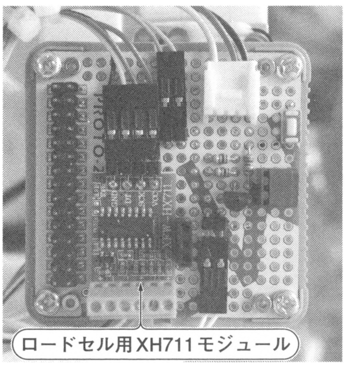
XH711モジュール基板と水分量センサ回路は，M5Stack用のユニバーサル基板モジュールで作成し



（a）コウモリランの環境をセンシングしながら円形LCDにコンディションを表示する



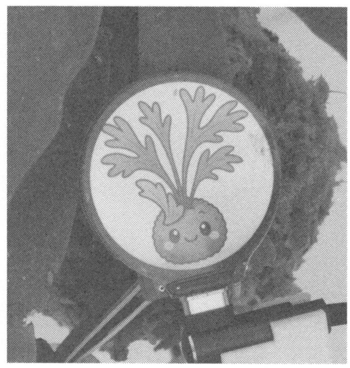
（b）回路部分だけ…切手サイズM5StampS3マイコンは円形LCDと一体にしている



（c）自作回路部…ユニバーサル基板M5Stack LLMモジュールに実装

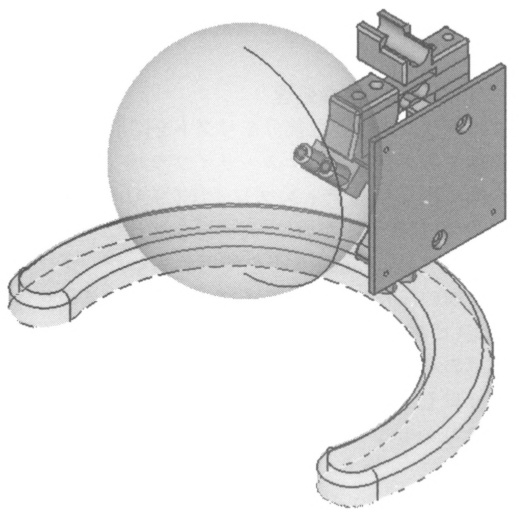


（d）円形LCDコンディション表示1…測定値

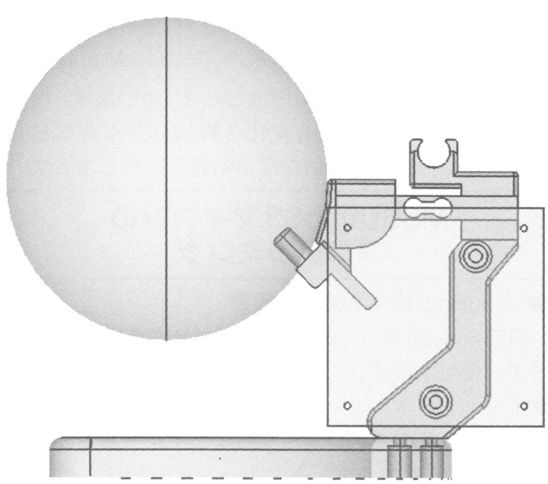


（e）円形LCDコンディション表示2…コウモリラン妖精

写真2　製作したコウモリラン育成モニタ



（a）全体像



（b）横から

図4　苔玉や回路を乗せる筐体…筆者は3Dプリンタで自作した

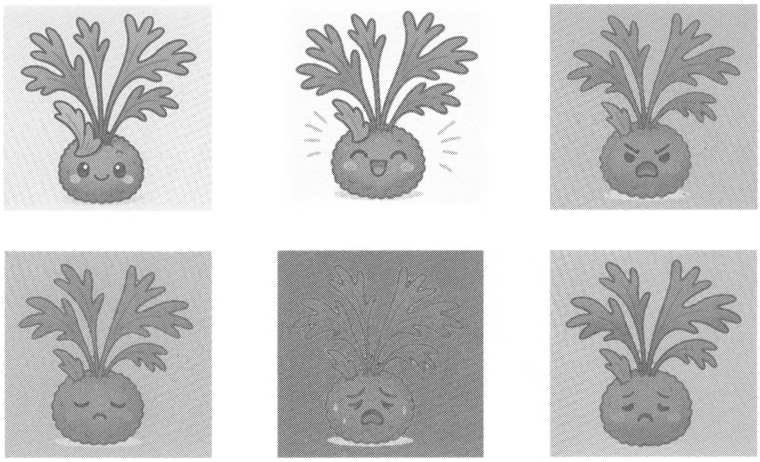


図5　画像生成にChatGPTを使うとコウモリランの妖精などもカンタンにいろいろできる

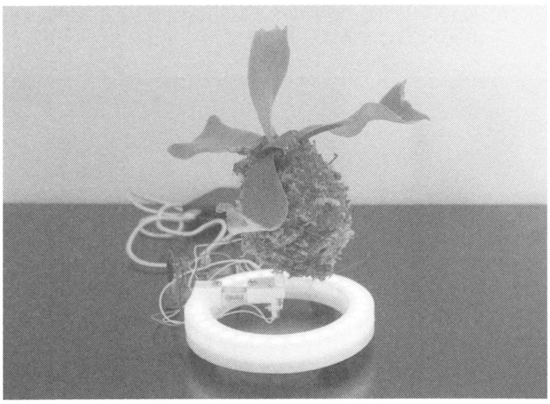


写真3　今回は紹介しないんだけど…コウモリランが空中に浮いているかのような別バージョンも作ってしまった

ました．こうしておけば，今後もいろいろ役立ちそうです．

● 環境センサ

環境センサにはBME680モジュールを使用しました．秋月電子通商で2,500円ほどしますが，温度，湿度，気圧，さらには揮発性有機化合物（VOC）ガスなども測定可能で，より多角的な環境情報を取得できます．

M5StampS3マイコンのプログラミング

● Arduino IDEへの追加の設定

M5StampS3はArduino IDEでプログラム開発できます．使用するには，いくつかの追加設定が必要です．

▶ボード・マネージャURLの追加

Arduino IDEのメニューからファイル→基本設定を開きます．「追加のボードマネージャのURL」の入力欄に，以下のURLを入力します．

https://espressif.github.io/arduino-esp32/package_esp32_index.json

▶ESP32ボード定義のインストール

メニューからツール→ボード→ボードマネージャ…を起動します．検索窓に「ESP32」と入力して検索し，esp32 by Espressif Systemsを見つけてインストールします．

▶プログラム・メモリの設定

今回は円形LCD表示用の画像データをプログラムに含めるので，多くのプログラム・メモリを必要とします．そのため，パーティション・スキームを変更しておきます．

メニューからツール→Partition Scheme:を選択し，Huge APP（3MB No OTA/1MB SPIFFS）を選択します．

▶デバッグ用オプション…USB CDC On Bootの設定

デバッグ情報をUSB経由のシリアル通信で確認したい場合は，メニューからツール→USB CDC On Boot:を選択し，Enabledを選択します．

● プログラムの主な処理

プログラムの主要な部分を**リスト2**に示します．

▶追加するグラフィックス・ライブラリ

今回，円形液晶ディスプレイ（GC9 A01コントローラ搭載）を制御するために，高機能なグラフィックス・ライブラリLovyanGFX(3)を使用しました．プログラムの最初の部分で，このライブラリと，液晶の具体的な設定（ピン配置など）を行っています．

苔玉の水分量は，円形のゲージとして液晶に表示するようにしました．この表示方法は，LovyanGFXライブラリのサンプル・プログラム(3)を参考に実装しています．

▶コウモリランのイラスト画像データ

コウモリランのイラスト画像データは，プログラム・コードとは別のヘッダ・ファイル（.hファイル）に

変換して記述し，プログラムから参照できるようにしています．

▶各種初期化

Arduino起動時に1回だけ実行される`setup()`関数内では，以下の初期設定を行っています．

- 仮想EEPROMの初期化(ESP32ではフラッシュ・メモリの一部をEEPROMのように使用できます)
- BME680環境センサの初期設定
- ロードセルの初期設定とキャリブレーション値の適用
- 液晶ディスプレイの初期化と表示準備
- ロードセルの補正値(キャリブレーションで求めた値)と重量測定部分の重さ(受け皿など)を補正するためのオフセット値の設定

● メイン処理と自動キャリブレーション

メインループ(`loop()`関数，またはタスク処理)の中で，定期的に苔玉の重量を測定しています．

測定した苔玉の重量が10g以下になった場合(つまり，苔玉がスタンドから取り外されたと判断された場合)，水分枯渇時重量および満水時重量測定モードに移行し，自動キャリブレーションを行います．このモードでは，乾燥させた状態の苔玉をスタンドに乗せ，そのときの重量(枯渇時重量)をシステムに記録させます．次に，その苔玉に水を十分に供給し，余分な水が切れた状態(満水状態)で再度スタンドに乗せ，そのときの重量(満水時重量)をシステムに記録させます．これら2つの重量の差分が，その苔玉の最大保水重量として計算されます．

測定・計算された枯渇時重量と最大保水重量は，それぞれ仮想EEPROMに保存され，次回以降の水分量計算に使用されます．

● コンディション判断

苔玉の重量が10g以上測定された場合(つまり，苔玉がスタンドに置かれていると判断される場合)，以下の計算式で苔玉に含まれる水の残量を推定します(水の比重は1として計算)．

水分量［g］＝現在の苔玉重量測定値－記録された枯渇時重量

水残量(率)［%］＝(記録された最大保水重量［g］－現在の水分量［g］)×100

算出した水分残量，BME680による温度測定結果，補助的に設置した自作水分量センサ(重量測定にかかわらず，極度の乾燥を検知した場合に水切れと判断するために使用)の値から状態を判断します．

具体的な水分残量(%)や，温度・湿度・気圧といった環境情報は数値で画面に表示します．その他，各種の数値情報を総合的に組み合わせて，コウモリランの現在の機嫌(コンディション状態)を段階で判断します(判断ロジックの基本的な考え方は，前編の水分モニタのLED段階表示の判断と同様)．段階に応じて，円形LCDに表示するコウモリランの妖精の表情を変化させることで，より直感的に表現します．

● 表示

液晶ディスプレイへの表示処理は，メインのセンサ情報取得や状態判別処理とは別のタスクとして独立させ，並行して動作するようにしました．これにより，表示処理が他の処理を妨げることを防ぎ，システム全体の応答性を向上させています．

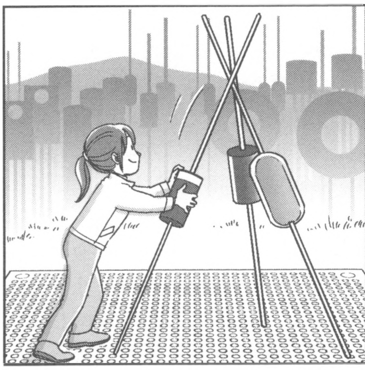
● データのシリアル出力について

このプログラムでは，各種センサから取得したデータはJSONフォーマットでシリアル・ポート経由で出力するようにしています．JSONデータとして外部出力することで，パソコンやエッジAI端末などと連携して，より高度なデータ分析や，例えば生成AIを用いた対話型の育成アドバイス・システムなど，将来的な機能拡張も容易になります．コウモリランに仮想的な感情を持たせたり，ユーザと会話したりするようなインタラクティブな機能も作れそうです．

◆参考文献◆

(1) 杉山 拓巳：ビカクシダ(NHK趣味の園芸 12か月栽培ナビ NEO 観葉植物)，2022年，NHK出版．
(2) M5StampS3ラウンド液晶モジュールのGitHub
https://github.com/urukakanko/M5StampS3_round_lcd-
(3) グラフィックス表示LovyanGFX ライブラリGitHub
https://github.com/lovyan03/LovyanGFX

未来の技術者を応援する トラ技Jr.コーナ



教科書では教えてくれない回路設計の「現実」

回路の動作が見えてくる！電子回路入門ノート

第1回 ドキッ！半導体はどう働くのか？… ダイオード回路の実力をかいま見る

新連載

藤田 雄司 Yuuji Fujita

本連載では，学生や回路設計初心者に向けて，

- ダイオードやトランジスタを使って，どのようなことができるのか？
- 方式や定数，部品はどうやって決めるのか？
- なかなか設計値通りに動作しないのはなぜか？

など，電子回路を理解する上での疑問やその周辺知識について，なるべくわかりやすく，興味をもってもらえるように解説していきます．

単純だと思われているダイオードの本当の実力とは

電子回路技術を学んできた人は，ダイオードは片方向だけ電流が流れるデバイスということはご存じでしょう．

この特性を利用して，交流を直流に変換する整流回路や，変調のかかったRF(無線周波数)信号からAF(可聴周波数)信号を取り出す検波回路などは教科書にもよく出てきます．

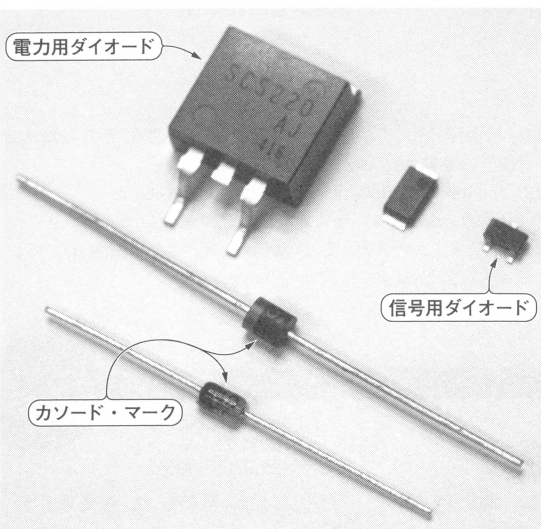


写真1 電力用に信号用…半導体の超基本素子ダイオードはいろいろな用途で使える

一見，単純な機能しかないように思えるダイオードですが，実は，これほど多種多様な機能を実現するデバイスは珍しいのです(写真1)．

まずは，接合型ダイオードの構造と動作，そして，パワー・エレクトロニクスの世界で使われるダイオードの応用回路を紹介します．

ダイオードが電流を1方向にだけ流すメカニズム

ダイオードの基本的な構造は，P型半導体とN型半導体という2種類の半導体を接合したものです．

P型半導体は，4価のシリコンに，ホウ素やインジウムなどの3価元素を微量混ぜて作られます．これによって，不足した電子の穴(ホール)ができ，このホー

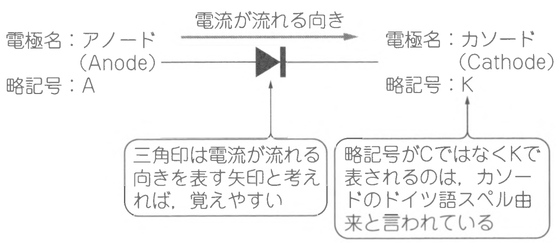


図1 ダイオードの回路図記号
矢印の方向には電流が流れ，逆向きは流れない

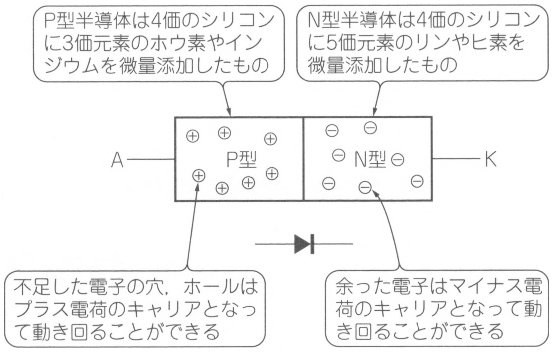


図2 ダイオードの構造
接合型ダイオードはP型半導体とN型半導体を接合したもの

ルがプラス電荷のキャリアとなって動き回ります．一方，N型半導体は，シリコンにリンやヒ素などの5価元素を混ぜて作ります．こちらは，余分な電子が生まれ，その電子がマイナス電荷のキャリアとなって動き回ります(**図1**，**図2**)．

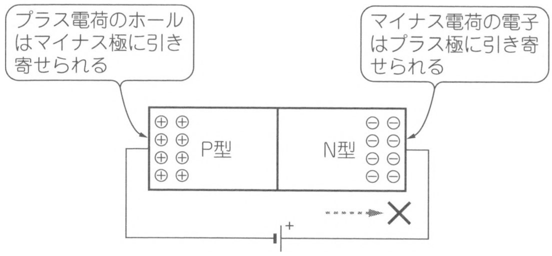
● 順方向と逆方向の電流の流れ

ダイオードは，P型半導体とN型半導体を接合して作られています．このダイオードに電圧をかけたとき，電圧のかけ方により電流が流れる場合と流れない場合があります．

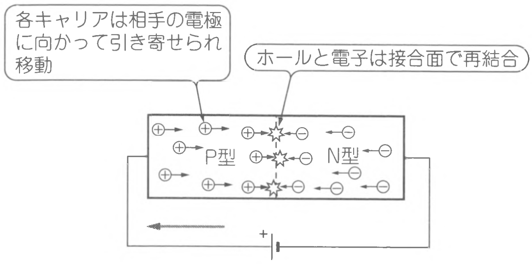
N型側にプラス，P型側にマイナス電位を印可した場合，N型にいる電子やP型にいるホールは，それぞれ自分の側の電極に引き寄せられてしまいます．その結果，接合部の間にキャリア(電子やホール)がいなくなり，電流はほとんど流れません．

一方，N型側にマイナス，P型側にプラスの電位を印可した場合(これを順方向という)，N型のマイナス電荷の電子とP型のプラス電荷のホールは接合部に向かって移動します．これにより，各キャリアが接合部で再結合し，電流が流れるようになります(**図3**)．

つまり，ダイオードは順方向にだけ電流を流し，逆方向には電流をほとんど流さないという特性をもっています．この性質を利用して，電気回路の中で電流の流れる方向を制御する役割を果たしています．



(a) N型にプラス，P型にマイナス電位を印加するとキャリアは各電極に偏り電流は流れない



(b) N型にマイナス，P型にプラス電位を印加すると各キャリアが移動し続け電流が流れる

図3 ダイオードが電流を1方向にだけ流すメカニズム

ダイオードがあれば①…電圧を何倍にも昇圧できる

● 電圧を2倍にする倍電圧整流回路

図4は交流電圧のピーク・ツー・ピークの電圧を直流に変換する倍電圧整流回路です．

交流が負のサイクルのとき，D_1を通じてC_1に電流i_Nが流れ負のピーク電圧がチャージされます．

正のサイクルになるとC_1にチャージされた電圧と入力の正のピーク電圧が直列になりD_2を通じてC_2にチャージします．

C_1の電荷はC_2をチャージするために使われますので初めは2倍には達しませんが，徐々に2倍に漸近していきます．

この結果，正のピーク電圧と，負のピーク電圧が直列になった約2倍の直流電圧を得ることができます．

● 倍電圧整流を積み重ねて数倍電圧にする

図5は倍電圧整流を何段も積み重ねて，より高い電圧を得られる倍電圧整流の応用回路です．交流のサイクルが繰り返されるたび，まるでポンプのように電圧を積み上げていくことができます．

出力電圧は，最終的に交流入力ピーク電圧のダイオ

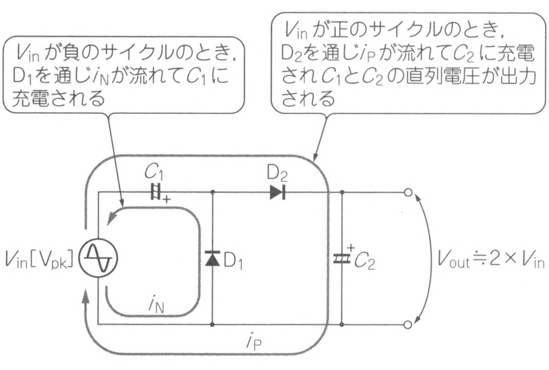


図4 倍電圧整流回路
交流入力電圧ピークの倍電圧に整流する

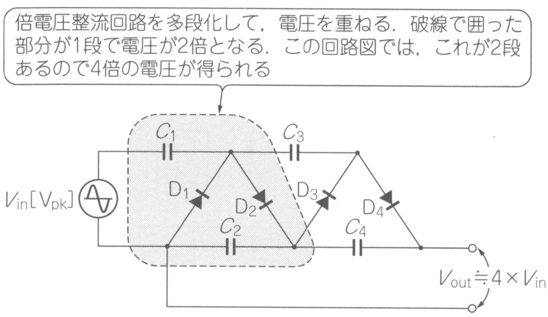


図5 「積み重ねた数」倍の電圧に昇圧できるコッククロフト・ウォルトン回路
交流入力電圧ピークの，ダイオード段数倍弱の直流電圧が得られる

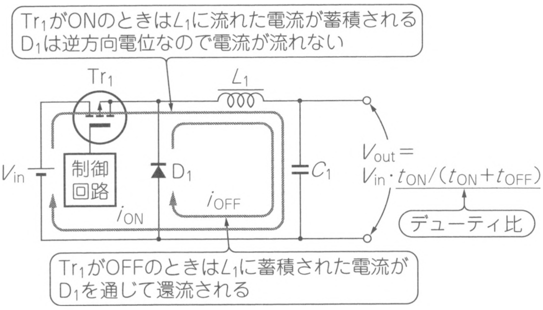


図6 ステップダウン・コンバータ回路
Tr_1のON/OFF(t_{ON}/t_{OFF})と連動して電流経路が切り換わり，デューティ比が入出力電圧比となる．Tr_1(トランジスタ)のt_{ON}(ONの時間)を$t_{ON}+t_{OFF}$(ON/OFF時間の合計)で割るとデューティ比が求められる．V_{in}(入力電圧)にデューティ比をかけるとV_{out}(出力電圧)が求められる

ード段数倍の電圧に漸近します．

実際にはダイオードに順方向電圧V_Fがありますので，段数×V_Fを差し引いた電圧になります．

発明者の名に由来してコッククロフト・ウォルトン回路と呼ばれています．

ダイオードがあれば②…任意の出力電圧を得られるDC-DCコンバータに

● ダイオードとスイッチング素子を組み合わせるメリット

図6は直流電圧を入力より低い電圧に効率よく変換するステップダウン・コンバータ回路，**図7**は直流電圧を入力より高い電圧に変換するステップアップ・コンバータ回路です．

交流ならば変圧器で容易かつ効率的に電圧変換できます．ところが，直流で電力を損なうことなく電圧変換するのは簡単ではなく，少し工夫が必要となります．

エジソンがテスラの交流送電に敗れた大きな原因は，当時の技術では直流で効率のよい電圧変換が難しかったためでした．

現代では高速でスイッチできるデバイスがあるため，スイッチング素子，インダクタ，コンデンサ，そしてダイオードを組み合わせて電流をコントロールすれば，任意の電圧に効率よく変換できます．

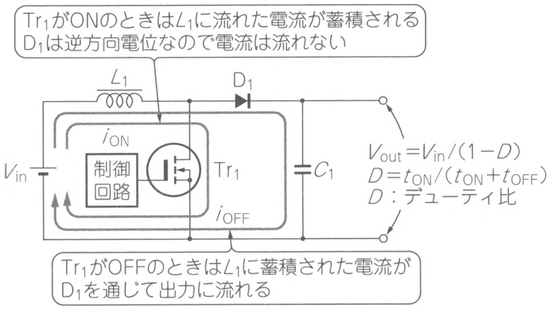


図7 ステップアップ・コンバータ回路
Tr_1のON/OFFと連動して電流経路が切り替わり，V_{in}を(1－デューティ比)で割った値がV_{out}になる

ダイオードがあれば③…パワエレのスイッチング回路の名脇役に

● スイッチを守りながらエネルギーを有効利用する

図8は100 W以下の小電力でよく使われるフライバック・コンバータの回路です．

フライバック・コンバータはどうしてもトランスの構造上漏れインダクタンスが生じます．この漏れイン

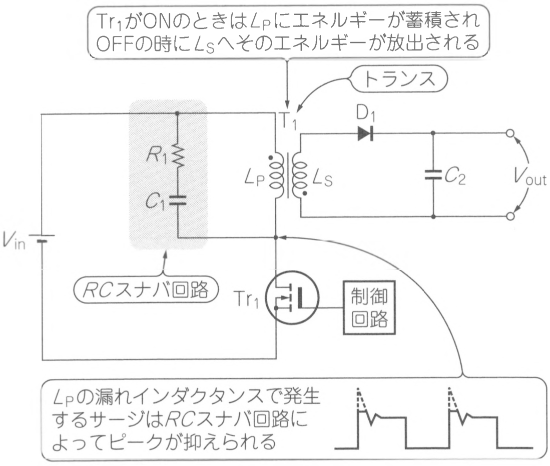


図8 任意の出力電圧を得られるフライバック・コンバータ回路
RCスナバ回路によってTr_1に加わるサージ電圧は，抑制されるが損失が増加する

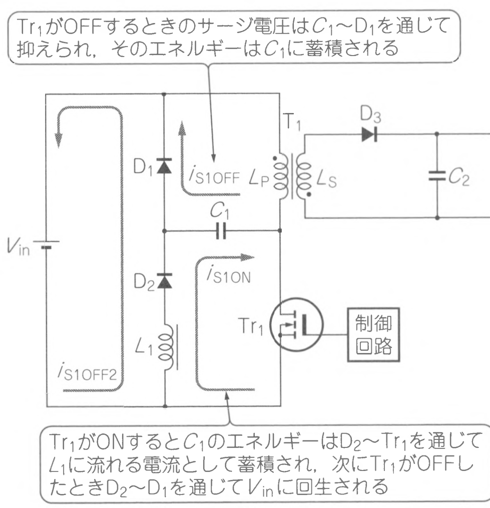


図9 フライバック・コンバータの回生スナバ回路
漏れインダクタンスによるサージ・エネルギーはV_{in}側に回生される

コラム　ダイオード回路記号の由来

電線がつながっていなくても声や音楽が流れ出てくるラジオ，その原理がわからずとても不思議に思えて強く興味をひかれたのを覚えています．

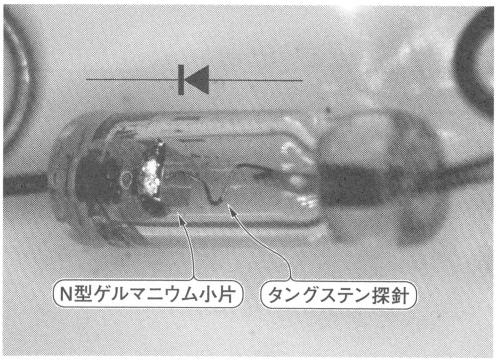
駄々をこねて買ってもらったのがゲルマニウム・ラジオでした．

ソレノイド・コイルにコアを出し入れして選局する同調回路，ゲルマニウムダイオード，クリスタル・イヤホンで構成され，100 pFのセラミック・コンデンサを介してアンテナにつなぐようになっていました．

ゲルマニウム・ダイオードはN型半導体にしたゲルマニウム小片にタングステンなどの探針を立てた構造になっています（**写真A**）．

ゲルマニウム小片と探針との接触点では局所的にP型領域ができ，その結果小さなPN接合，つまりダイオードが形成されるのです．ダイオードの回路記号は板に三角で表され三角を矢印に見立てると流れる電流の向きを表している，という解説はよく見かけます．しかし板は半導体小片，三角は探針を表しているのではないかと筆者は考えています．ショックレーたちがゲルマニウムを土台（ベース）にして2本の探針間隔を狭めていくと増幅作用があることを発見したトランジスタ，この回路記号も同様です．

〈**藤田 雄司**〉



写真A　ゲルマニウム・ダイオードの構造と回路記号

ダクタンスがスイッチング素子OFF時に大きなサージ電圧を発生させます．

このサージ電圧がスイッチング素子Tr_1の最大電圧を超えてしまうと破損につながるため，通常RCスナバ回路もしくはRCDスナバ回路を付加してサージ・エネルギーを消費させ，ピーク電圧を抑制します．

ところが，これらのスナバ回路は抵抗で熱に変換してエネルギーを消費させるため回路全体の効率低下が避けられません．

図9はスイッチング素子がOFFする際に発生するサージ電圧を抑え，かつ，そのエネルギーを抵抗で消費させずに入力へ回生するスナバ回路です．

Tr_1がOFFになった際，L_Pの漏れインダクタンスによって発生したサージはC_1-D_1を通じて短絡されピーク電圧が抑えられます．

このとき，C_1に蓄積された電荷は次にTr_1がONした際L_1-D_2-C_1-Tr_1の経路で電流が流れL_1にエネルギーが移動します．

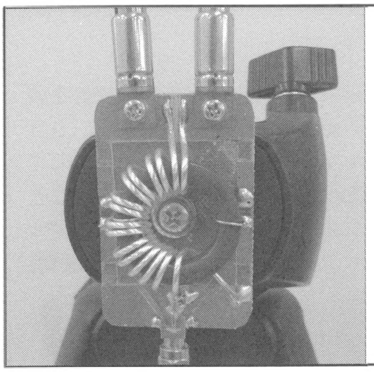
L_1にたまったエネルギーは次にTr_1がOFFになった際，D_2-D_1を通じてV_{in}に回生されるというわけです．

*　　*　　*

紹介した回路で実際に設計する際は，目的に合ったデバイスを選択し，詳細な特性まで配慮した定数の最適化が必要です．

今回は動作の理解に主眼をおいたので，なるべく数式は用いず枝葉部分は省略した回路での説明としました．

次回は，ダイオードを信号のスイッチや可変抵抗として応用した例を紹介します．



室内V型アンテナでラジオ受信を楽しむ!

FM放送不感エリア解消! MOSFET3段卓上アンテナ

歩庵枯 杏里　Anri Poankaré

本稿ではFM放送の電波が届きにくい地域でも受信できるようになる85 MHz帯V型ブースタ・アンテナ(**写真1**)を製作します. 卓上で使えるように作ってみました.

従来のFMラジオ局に加えて, これまで中波で放送していたAMラジオ局も超短波でのFM放送を開始しました. FM放送の電波はAM放送に比べて波長が約1/100なので, 小型の放送アンテナ設備で運用が可能です. しかし伝搬距離すなわちサービス・エリアも近距離に限定されます. 放送所から離れた場所で受信しようとしても十分な電界強度が得られないことがあります. この問題を打開するのがブースタ・アンテナです. 実際のブースタの効果を**表1**に示します.

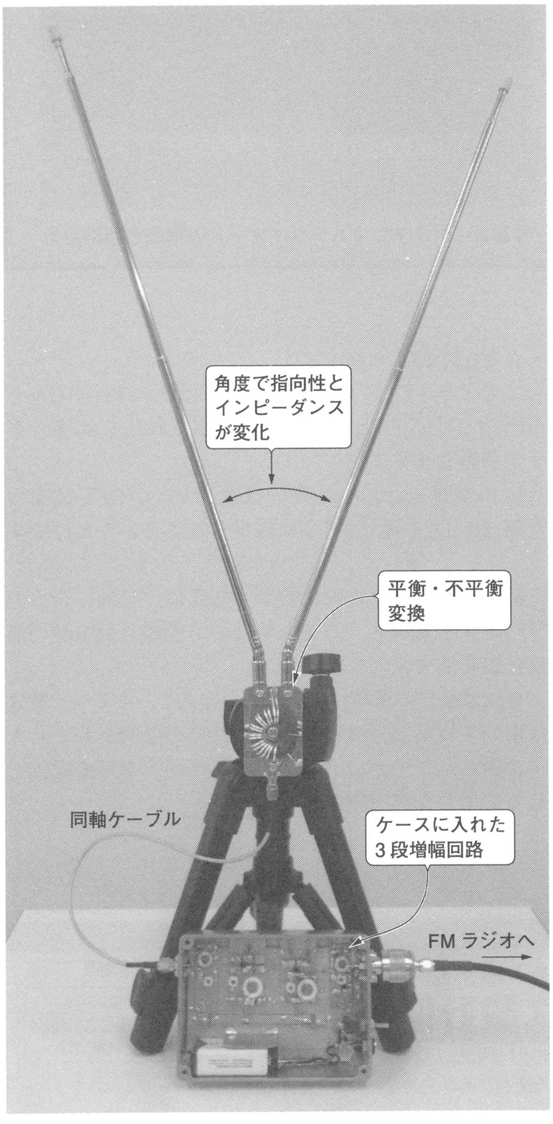


写真1　+60 dB増幅! FM(85 MHz)用卓上V型ブースタ・アンテナ
市販のロッド・アンテナ2本と増幅回路で構成される. 定番高周波用MOSFET 2SK241 3段で増幅

構成

製作するブースタ・アンテナの構成を**図1**に示します. 室内アンテナで捉えた極めて微弱な電波をFET3段で増幅します. 中心周波数85 MHzにおけるゲインは1段あたり20 dBとし合計60 dBを目指します.

一般に小信号FETはアンテナに比べて格段に高インピーダンスなので入力と出力に整合回路を挿入します. これらの整合回路ならびに段間結合回路はLC素子で構成し85 MHzで共振するフィルタの機能を兼ねます.

表1　ブースタありの効果…FM放送受信スペクトル観測結果

	放送局	周波数 [MHz]	アンテナ単体受信レベル [dBm]	ブースタあり出力レベル [dBm]
#1	ZIP FM	77.8	−66	−54
#2	FM愛知	81.3	−73	−41
#3	NHK 浜松	82.1	−	−45
#4	やしの実	84.3	−71	−20
#5	NHK 豊橋	85.3	−71	−7
#6	東海ラジオ	91	−62	−27
#7	CBCラジオ	91.8	−61	−30

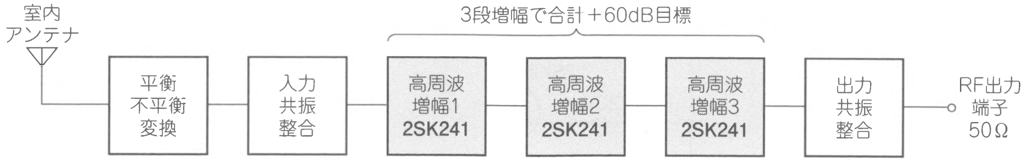


図1　製作するブースタ・アンテナの構成

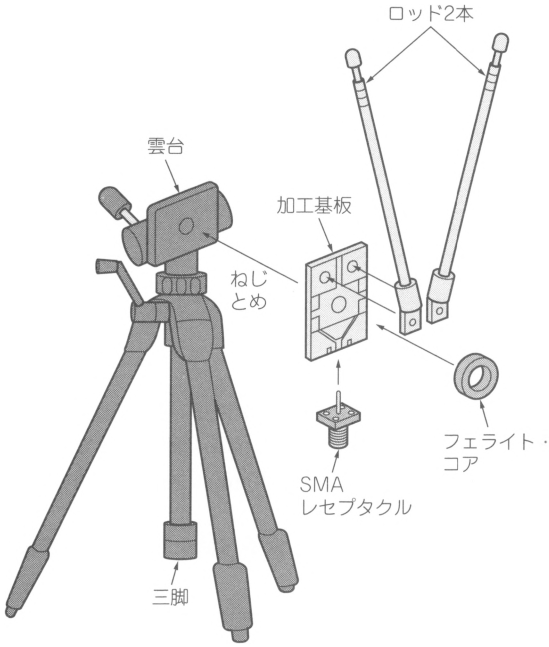


図2　卓上V型アンテナのスタンド組み立て

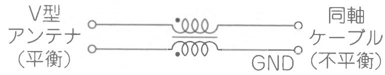


図3　平衡・不平衡変換を回路表示

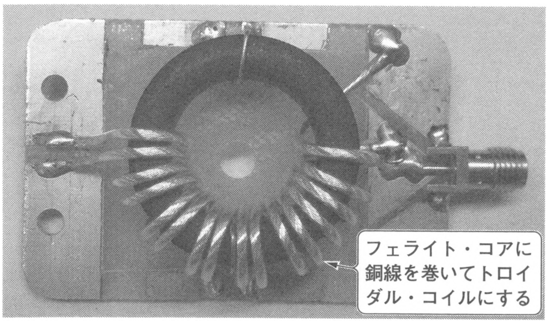


写真2　平衡-不平衡変換部
加工基板にトロイダル・コイルと同軸レセプタクルを取り付ける

卓上V型アンテナの製作

市販のロッド・アンテナ2本を組み合わせてV型ダブレット・アンテナを構成します．この形状は万歳アンテナとも呼ばれています．アンテナを卓上に安定に立てるため，カメラ用三脚を用いました．具体的には2本のロッドをカット基板で三脚の雲台にネジ止め固定します．組み立て図を**図2**に示します．

組み立てたアンテナを50Ω同軸ケーブルでブースタ回路と接続します．ダブレット・アンテナが平衡動作であるのに対し同軸ケーブルは不平衡線路です．そこで給電ポートの根元にフェライト・コアに巻いたトロイダル・コイルを挿入して，平衡-不平衡変換します（**図3**，**写真2**）．この変換はバランまたはコモン・モード・チョークとも呼ばれます．

ここではFair-Rite社のフェライト・コアFT-114-61（黒）にフロン樹脂被覆銅線2本をペアで8回巻きました．これでコモン・モード・インダクタンスが5 μ～6 μHとなります．

ロッド長さの伸縮とV型の鋏角（きょう）を開閉することでインピーダンスと指向性が変化します．

インピーダンスや指向性を観測しながらアンテナを調整するのは再現性がよくありません．それらの特性はアンテナを置いた場所の周囲環境にかなり左右されるからです．現実的には放送波を受信した状態で感度が最大になるようにアンテナを調整するのが正解です．

増幅回路の製作

VHF帯小信号デバイスと言えばMOSFET 2SK241（東芝）です．ピン配置を**図4**に示します．増幅回路を**図5**に示します．ゲインを稼ぐためソース接地3段とします．

入力端（フロントエンド）の整合回路はインピーダンス変換50Ω：10 kΩを兼ねたLC共振回路です．また

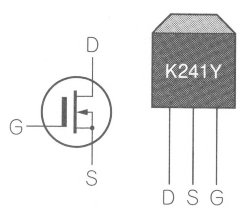


図4　2SK241のピン配置
どスゲー！ と覚えよう

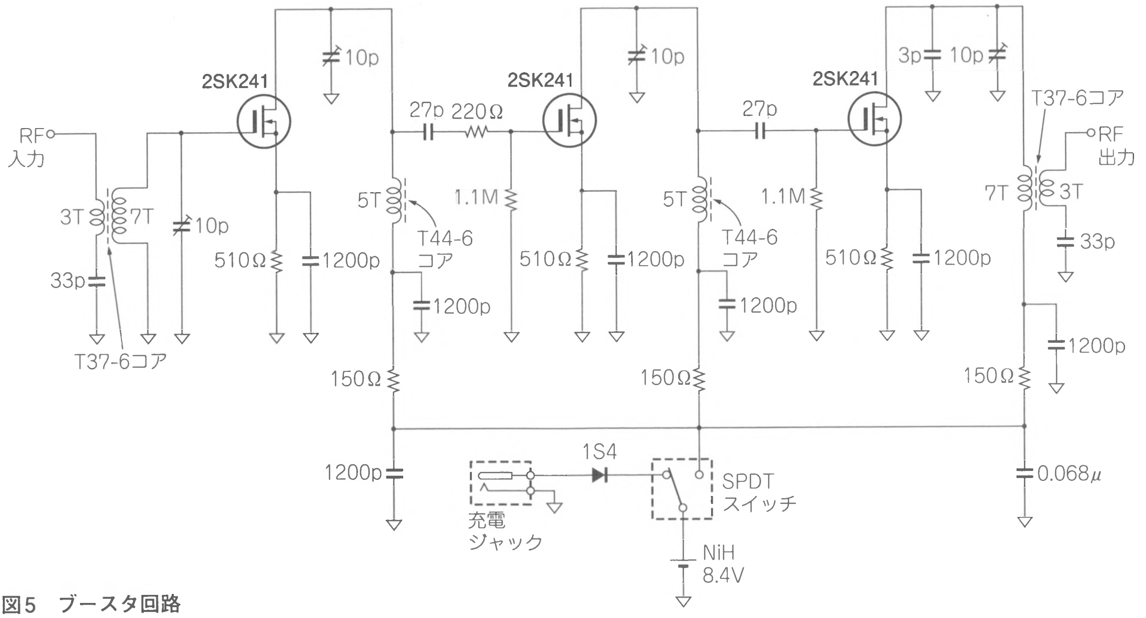


図5　ブースタ回路

出力端(ファイナルエンド)にも同じLC回路を左右逆向きに用います．いずれも低インピーダンス側を直列共振，高インピーダンス側を並列共振とするところがポイントです．

共振回路に使うトロイダル・コイルのコアはMicrometals社(Amidon社)のT-37-6またはT-44-6を使います．段間を含めて合計4個の共振です．これらはトリマ・コンデンサ10 pFで共振周波数の微調整を行います．

実体配線図を**図6**に，これを収納するケースを**写真3**

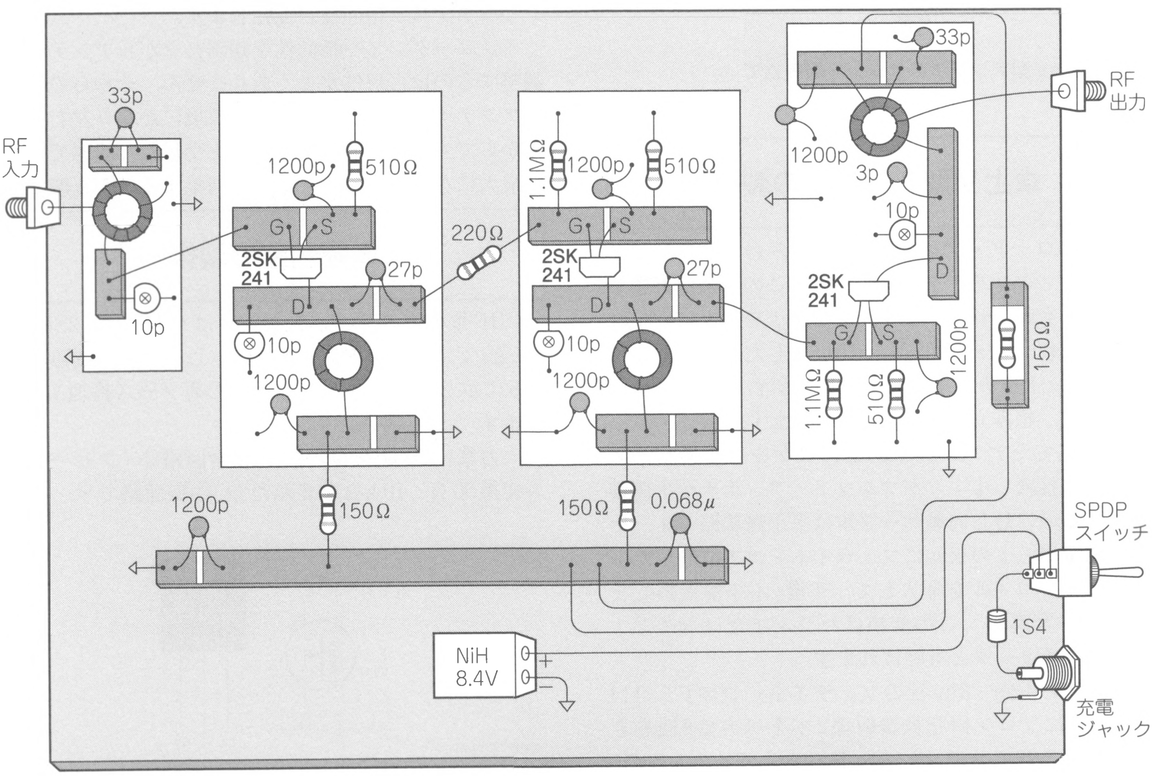


図6　銅張りフロア基板上の実体配線図

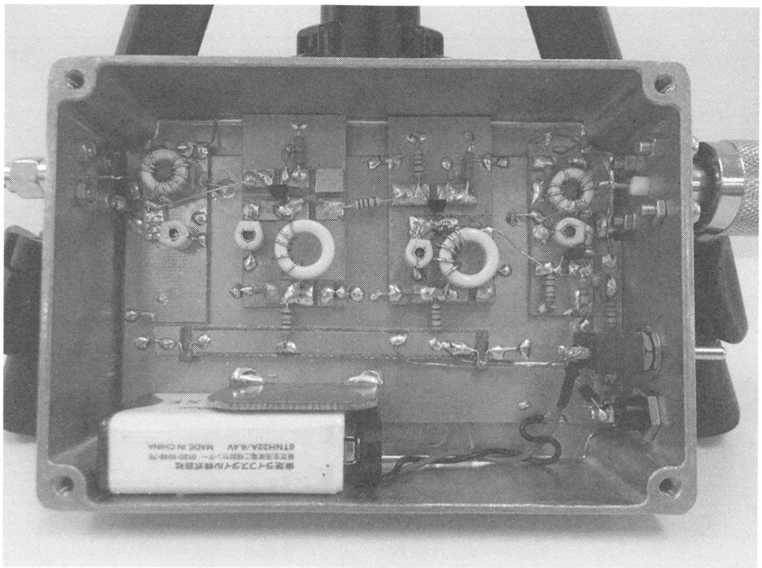


写真4　完成したブースタ回路

にそれぞれ示します．

フロアは全面銅張り基板です．RF入出力同軸レセプタクルのGND端子を最短距離で基板にはんだ接続してあるのが要点です．これにより機械的にも電気的にも基板がしっかり安定します．DC充電コネクタのGNDも同様です．

このフロアへ各回路ブロックの小さな基板を順次並べていきます．配置レイアウトが決まったら各ブロック基板を両面テープでフロアに仮とめします．全体が完成し，動作確認できたら各基板のコーナを銅線とはんだ付けでフロア基板に固定します．増幅回路完成写真を**写真4**に示します．

主要部品

使用する部品のリストを**表2**に示します．比較的高価な部品としては三脚スタンド(カメラ用)です．市販スタンドの替わりにホームセンタで手に入る木材などをうまく使って自作すれば経費節約できます．

今回製作したアンテナをキャンプなど野外活動に持ち出すことも想定して，しっかりしたアルミ・ダイキャスト製を使いました．もし使用場所を室内に限定すれば，防水の必要がないので木箱かプラスチック箱で代用できます．ただしそのときは高周波的に遮へいする意味で，箱の内側全面に銅箔かアルミ箔を貼り付け基板のGNDに接続しておくとよいでしょう．

同軸レセプタクルとして部品箱にあったSMA型50Ωを流用しましたが新規に購入するならテレビ用F型75Ωのほうが民生品としてホームセンタなどで安価に入手できます．

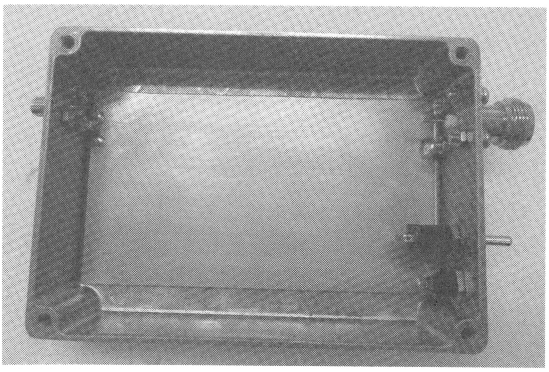


写真3　実装前のケース

実装前のケース写真はさながら新築住宅のリビングにこれからDIYの家具達を配置していく楽しさを感じませんか．これぞディスクリート電子工作愛好家の特権ですね

伸縮ロッドはデジット(大阪・でんでんタウン)で10本500円で購入しました．もし仮に通販でこの値段だったら少し不安を感じます．店頭購入は自分の目で現物確認してレアものを入手できるという醍醐味があります．

性能確認

● ブースト前の受信状況

製作したブースタ・アンテナの性能を見るため，**図7**に示す実験系でスペクトルを観測しました．ブースタなしの**図7(a)**ではV型ダブレットをスペクトラム・アナライザに直結します．その観測結果を**図8(a)**に示します．85 MHzを中心に＋/－10 MHzをスイープ

表2　主要部品リスト

品　名	型　名	仕　様	メーカ	主な入手先	単価(円)	備　考
電界効果トランジスタ	2SK241	NMOSFET	東芝	デジット	50	−
半固定コンデンサ	GKG10015	10 pF	EW Electronics	DigiKey	153	外形色：白
コンデンサ	RDEシリーズ 50V	3 pF, 27 pF, 33 pF, 1200 pF, 0.068 μF	村田製作所	共立エレショップ	66	積層セラミック
抵抗	ラジアルリード P型1/4W	150 Ω, 220 Ω, 510 Ω, 1.1MΩ	KOA	デジット	12	−
カーボニル・コア	T37-6	外径 ϕ 9.5 mm, 6材	Micrometals (Amidon)	共立エレショップ	168	−
	T44-6	外径 ϕ 11.2 mm, 6材			248	−
同軸レセプタクル	SMA 50 Ω	エッジ取付型 金メッキ	RS Pro	モノタロウ	849	−
ダイオード	1S4	40V 1A	パンジット	秋月電子通商	20	−
切り替えスイッチ	MS-166-K	SPDT	ミヤマ電器	DCMミラまち	280	−
DC電源ジャック	MJ14ROHS	ϕ 2.1 mm	マル信無線電機	DCMミラまち	120	−
カット基板	銅張積層板 10番	紙フェノール	サンハヤト	モノタロウ	299	−
アルミダイキャスト箱	TD9-12-4N	85 × 35 × 120 mm	タカチ電機工業	モノタロウ	977	シールドふた付き
フェライト・コア	FT-114-61	外径 ϕ 29 mm, 61材	Fair-Rite	共立エレショップ	528	−
伸縮ロッド	非表示	ステンレス円筒4段	非表示	デジット	50	10本500円
三脚スタンド	EX-mini S	2段式	ベルボン	アマゾン	2980	−

したところ6局が確認できました．レベルはいずれも－80～－60 dBmです．

● ブースタを挿入すると＋60 dB程度も強力に！

そこで，**図7(b)**のようにブースタを挿入しました．帯域中心である85 MHz付近に見えるスペクトル(NHK豊橋)のレベルが最大になるようにブースタの4つのトリマ・コンデンサを調整しました．結果を**図8(b)**に示します．－71 dBmだったNHK豊橋が－7 dBmまでブーストされています．ブースタを挿入したことで75 M～95 MHzで少なくとも7局が観測できました．結果を**表1**に示します．

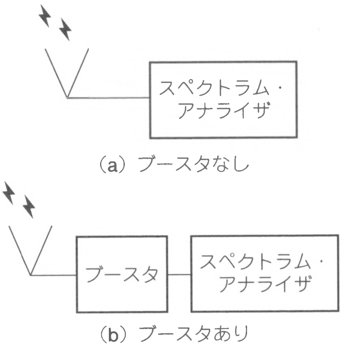


図7　スペクトル観測の実験系

◆参考文献◆

(1) 山村 英穂；改訂新版定本トロイダル・コア活用百科，pp. 359-379, 2006年12月，CQ出版社．

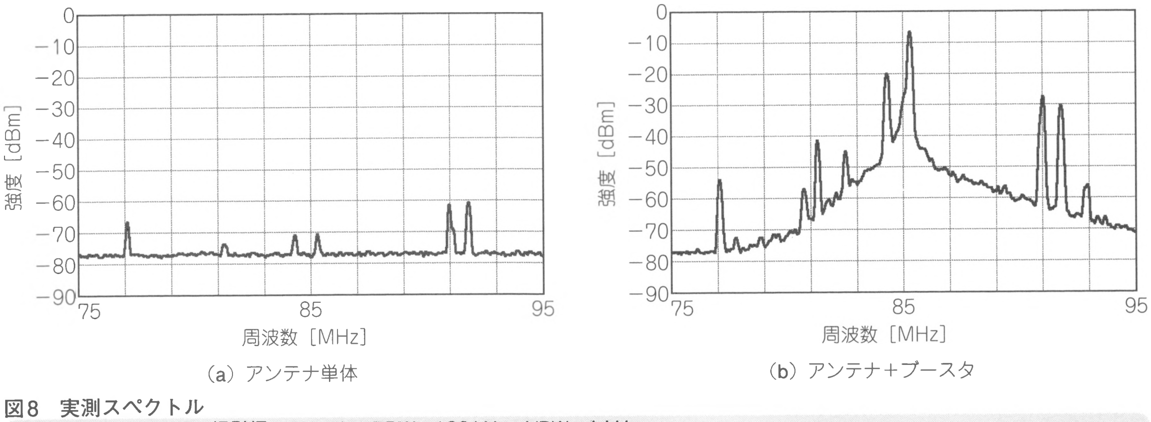


図8　実測スペクトル
中心周波数：85 MHz，掃引幅：20 MHz，RBW：100 kHz，VBW：1 kHz

Reader's FORUM

11月号の感想

特集「チョコッと便利が大集合！電子回路をはじめよう」

■最近，電子工作系から高周波系まで範囲が広がったように思います．知らないことも多く，新しいことがわかり，楽しんでいます．　(K6)

■知らない領域はいつだって初学者．助かってます．　(切れ散らし寿司)

■多くのヒントになる個々の記事が良かった．　(猫の後ろ頭)

■「オフセットがほぼゼロの超高精度アンプ」(第4章-16)．読んでこれはすごいと思いました．読み応えあります．　(yoshi)

連載

■IoT実験ラボ，楽しく読ませていただきました．過去に使われていた技術でも最近は手軽に利用できるようになっていることを感じました．便利になっている技術が楽しく読めてよいです．　(Tad)

トランジスタ技術SPECIAL

■No.172の「電波とくふうのラジオ回路」，基礎的な電磁波の知識やジャンク・チューナ部品の記事などかゆいところに手が届く記事が多く非常に面白かったです．　(Beige)

エンジニア川柳募集！テーマは「あるある！上司やお客さんからの無茶振り」

そ，そんな～!?と叫びたくなる無理難題も対応しなくてはいけないのがエンジニア！そんなみなさまの体験談を五・七・五に込めてお聞かせください．投稿をお待ちしています！　〈編集部〉

※投稿は，読者アンケートからお寄せください．採用された方には500円分の図書カードを進呈します．

テーマ：「あるある！上司やお客さんからの無茶振り」

今月の大賞



仕様にない
でもやるのよね
やっぱりね
(栗林 泰治)

当初の仕様にないことが，回路設計も基板設計も終わった後に出てくる．最初の頃は抵抗していたが，でも結局やることになる．だから，そのうちに時間の無駄な抵抗はせずにハイハイと回路を修正し，基板の変更をやる．それが弱い立場の設計者の生きる道．

読者プレゼント

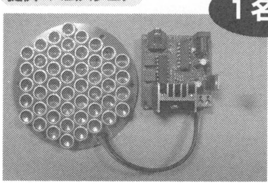
カラー写真はp.36へ！

▶読者アンケートへご協力ください
本誌[読者アンケート]のWebページからお申し込みいただけます．

① パラメトリック・スピーカー実験キット(完成品)

提供：ハムスクエア

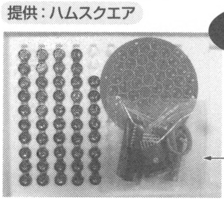
1名様



② パラメトリック・スピーカー実験キット(組み立てキット)

提供：ハムスクエア

1名様

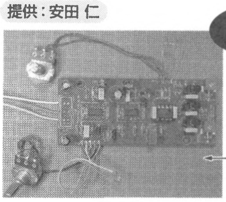


自分で部品を実装するキットです

③ トランジスタをはしご状にしたラダー型VCFの製作 生基板

提供：安田 仁

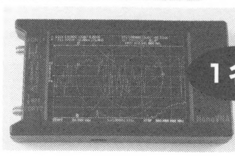
2名様



基板のみ！部品はご用意ください

④ 1.5GHzネットアナ NanoVNA 4インチ版

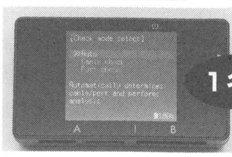
提供：トランジスタ技術編集部



1名様

⑥ 最新型！USBケーブルチェッカー3

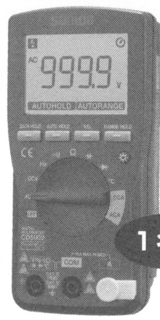
提供：ビット・トレード・ワン



1名様

⑤ ディジタル・マルチメータ CD5002

提供：三和電気計器



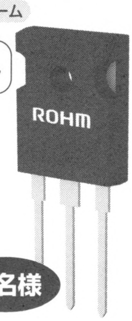
1名様

3号エンジニア応援！

⑦ 次世代パワエレ！SiCトレンチMOSFETを10個 SCT3030ALGC11

提供：ローム

今月でラスト！



1名様

訂正とおわび

本誌のバック・ナンバーにおいて，下記の箇所に誤りがありました．おわびして訂正いたします．
https://toragi.cqpub.co.jp/category/correction/

■2025年12月号

● 特集

p.58 コラム7 図F(a)/(b)回路図記号OPアンプの左側のコンデンサ→トル

p.89 図2 式の左項a_1，a_2→b_1，b_2

p.102 図1 IC_1 74HC04N → 74HCU04N

p.137 表3 局部発振器X_3 SiT8008BI-31-33E-3.561000→3.541000

p.139 Tr_2・Tr_3 A03401A → AO3401A，IC_3 SA5124 → SA612A，C_{25} 4.7 μ→47 μ

p.143 図A(補足)地図上の○がTX

トランジスタ技術 2月号は1月9日発売

2026年2月号のお知らせ

ラズパイPico実験！

農業センシング・自動化



編集余録

■スマホ連携の体組成計生活はや1年．運動食事の増減でてきめんに変化するのが面白くて体重減に成功！と思ってたら最近やや戻し気味．ただの季節変動としたら秋マジヤベー．(54)

■技術書典の日は誘惑に負けて空まつり2025 in SEKIYADO NODAに行ってしまいました．M-02J，オートジャイロ，マイクロライトプレーン，グライダーなどなど，大変楽しめました(老)

■帰省先から家に戻ると鍵がない！ JR忘れ物チャットに日時や新幹線の座席情報，鍵の特徴をアップ．2日後に似たものありとの連絡．決め手は一緒にぶら下げていた名彫りの土産物．(川)

■この1カ月の出来事．応急医療講習を受けた．ビートボックスを初めて生で見た．久々に着物を着た．武道館のステージに立った．友人が3人入れ替わり泊まりに来た．人生が濃い！(理)

■ブルーインパルスが飛び立つ所を見に行った．急降下，大空に描かれる☆などに大興奮．でも近すぎてどこから来るのか見失いがち．誰かのアッ来た！の声と指さす方が頼り (祥)

■冬用タイヤに交換．前回ホイールボルト方式に慣れてなくて腕パンパン膝が笑う経験から，ガイドボルトやリフターを準備．確かに楽だけどやっぱり重い．スタンドに持ち込むか(御)

■今年もまた区のプレミアム付き商品券に食いつき必死になって並んで買いました．とはいえ使い道のビジョンがないので使用期限間近にあせって消費することでしょう．(制)

■ 技術書典の日は，誘惑に負けてデザフェスに行ってしまいました．トラ技編集部員たるものなのにごめんなさい．もちろん，オンライン・マーケットはチェックしてます！(ほ)

発行所 CQ出版株式会社
〒112-8619 東京都文京区千石4-29-14
電 話 編集 03-5395-2123
広告 03-5395-2132
販売 03-5395-2141
振 替 00100-7-10665

発行人 櫻田 洋一
編集人 上村 剛士

2026年1月1日発行（毎月1回1日発行）

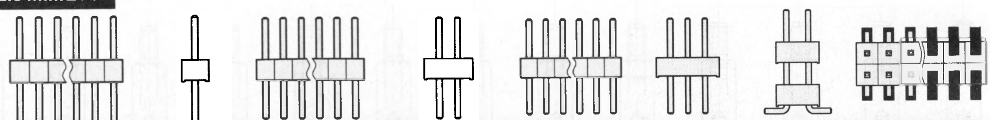
(定価は表四に表示してあります)

印 刷 三晃印刷㈱／㈱DNP出版プロダクツ／三共グラフィック㈱／クニメディア㈱
製 本 三晃印刷㈱
Printed in Japan

ヒロスギのPC取付パーツ

ピンヘッダー 角ピン 2024年納品数 698万1,617個

2.54mmピッチ



仕様
電流容量:3A

本体樹脂部
材質:PBT
色:黒

コンタクト部
材質:黄銅
処理:金フラッシュ

ピン数	品番	単価
2	PSS-410153-02	14
3	PSS-410153-03	15
4	PSS-410153-04	16
5	PSS-410153-05	17
6	PSS-410153-06	17
7	PSS-410153-07	18
8	PSS-410153-08	19
9	PSS-410153-09	20
10	PSS-410153-10	21
ピン数	品番	単価
2	PSS-410153-02TA	26
3	PSS-410153-03TA	27
4	PSS-410153-04TB	31
5	PSS-410153-05TB	32
6	PSS-410153-06TB	32
7	PSS-410153-07TB	33
8	PSS-410153-08TC	37
9	PSS-410153-09TC	38
10	PSS-410153-10TC	39

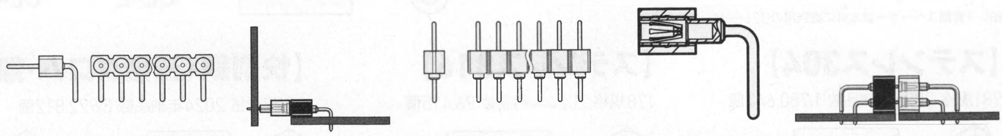
ピン数	品番	単価
4	PSS-420153-02	16
6	PSS-420153-03	18
8	PSS-420153-04	19
10	PSS-420153-05	21
12	PSS-420153-06	23
14	PSS-420153-07	24
16	PSS-420153-08	26
18	PSS-420153-09	28
20	PSS-420153-10	30
ピン数	品番	単価
4	PSS-420153-02TA	28
6	PSS-420153-03TA	30
8	PSS-420153-04TB	34
10	PSS-420153-05TB	36
12	PSS-420153-06TB	38
14	PSS-420153-07TB	39
16	PSS-420153-08TC	44
18	PSS-420153-09TC	46
20	PSS-420153-10TC	48

ピン数	品番	単価
6	PSS-430253-02	16
9	PSS-430253-03	18
12	PSS-430253-04	20
15	PSS-430253-05	22
18	PSS-430253-06	24
21	PSS-430253-07	26
24	PSS-430253-08	28
27	PSS-430253-09	30
30	PSS-430253-10	32
ピン数	品番	単価
6	PSS-430253-02TB	31
9	PSS-430253-03TB	33
12	PSS-430253-04TB	35
15	PSS-430253-05TB	37
18	PSS-430253-06TB	39
21	PSS-430253-07TB	41
24	PSS-430253-08TC	46
27	PSS-430253-09TC	48
30	PSS-430253-10TC	50

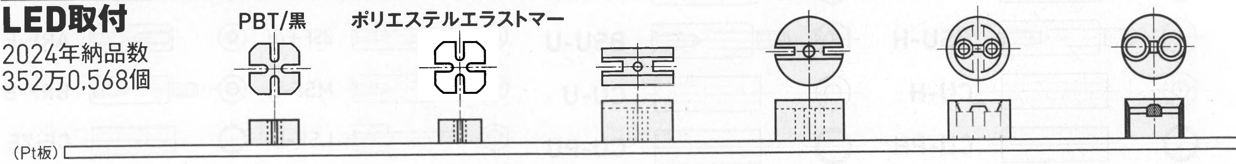
ピン数	品番	単価
4	PSM-420533-02	24
6	PSM-420533-03	29
8	PSM-420533-04	35
10	PSM-420533-05	40
12	PSM-420533-06	46
14	PSM-420533-07	52
16	PSM-420533-08	57
18	PSM-420533-09	63
20	PSM-420533-10	68
ピン数	品番	単価
4	PSM-420533-02TA	36
6	PSM-420533-03TA	41
8	PSM-420533-04TB	50
10	PSM-420533-05TB	55
12	PSM-420533-06TB	61
14	PSM-420533-07TB	67
16	PSM-420533-08TC	75
18	PSM-420533-09TC	81
20	PSM-420533-10TC	86

ピンヘッダー 丸 ピン 2024年納品数 21万5,971個

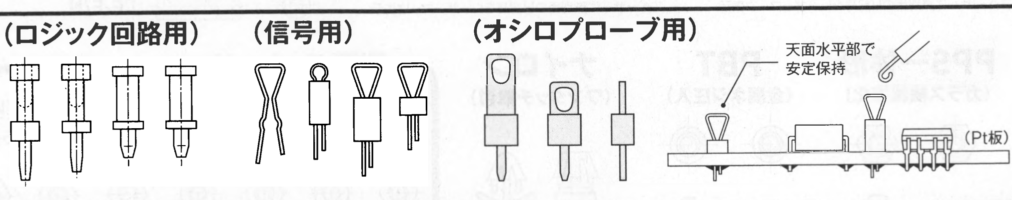
本体樹脂部
LCP/PCT
ナイロン



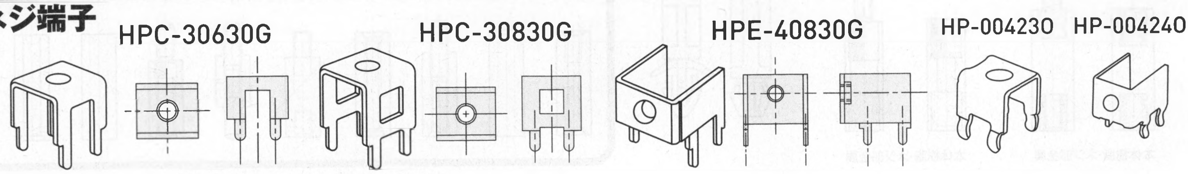
LED取付
2024年納品数
352万0,568個



チェック端子 (ロジック回路用) (信号用) (オシロプローブ用)

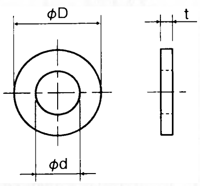


ネジ端子



ヒロスギのワッシャー・ブッシュ・ネジ

樹脂ワッシャー 26機種:7,046規格

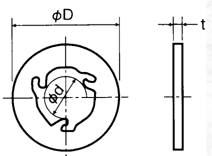


品番	材質
CC	ジュラコン(POM)
CC-B	黒ジュラコン(黒POM)
TT	PTFE
NN	ナイロン(ナイロン6)
NN-B	黒ナイロン(ナイロン6)
NQW	衝撃吸収ナイロン
MM	MCナイロン
PCW	ポリカーボネート
PSW	PPS

品番	材質
PEW	ピーク
RYW	レニー
RYW-B	レニー(黒)
PVW	PVDF
VCW	ポリ塩化ビニル(灰色)
VCW-S	ポリ塩化ビニル(透明)
PPW	ポリプロピレン
XX	ベーク(フェノール樹脂)
GG	ガラエポ
VV	低クリープ(PTFE)
EE-R	赤ファイバー
EE-W	白ファイバー
POLW	ポリエチレン
KK	カプトン(ポリイミドフィルムカプトン)
LUW	ルミラー(半透明)
LUW-R	ルミラー(赤)
LUW-L	ルミラー(青)

d	D	t	POM(乳白色)		POM(黒色)		PTFE		ナイロン	
			品番	単価	品番	単価	品番	単価	品番	単価
1.7	4	0.2	CC-1704-02	8	CC-1604-02B	8	TT-1704-02	8	NN-1604-02	8
		0.25	CC-1704-025	8	CC-1604-025B	8	TT-1704-025	8	NN-1604-025	8
		0.3	CC-1704-03	8	CC-1604-03B	8	TT-1704-03	8	NN-1604-03	8
		0.35	CC-1704-035	8	CC-1604-035B	8	TT-1704-035	8	NN-1604-035	8
		0.4	CC-1704-04	8	CC-1604-04B	8	TT-1704-04	8	NN-1604-04	8
		0.5	CC-1704-05	8	CC-1604-05B	8	TT-1704-05	8	NN-1604-05	8
		0.6	CC-1704-06	8	CC-1604-06B	8	TT-1704-06	9	NN-1604-06	8
		0.7	CC-1704-07	8	CC-1604-07B	8	TT-1704-07	9	NN-1604-07	8
		0.8	CC-1704-08	8	CC-1604-08B	8	TT-1704-08	8	NN-1604-08	8
		0.9	CC-1704-09	8	CC-1604-09B	8	TT-1704-09	10	NN-1604-09	8
		1	CC-1704-10	8	CC-1604-10B	8	TT-1704-10	10	NN-1604-10	8
2.2	4	0.2	CC-0204-02	8	CC-0204-02B	8	TT-0204-02	8	NN-0204-02	8
		0.25	CC-0204-025	8	CC-0204-025B	8	TT-0204-025	8	NN-0204-025	8
		0.3	CC-0204-03	8	CC-0204-03B	8	TT-0204-03	8	NN-0204-03	8
		0.35	CC-0204-035	8	CC-0204-035B	8	TT-0204-035	8	NN-0204-035	8
		0.4	CC-0204-04	8	CC-0204-04B	8	TT-0204-04	8	NN-0204-04	8
		0.5	CC-0204-05	8	CC-0204-05B	8	TT-0204-05	8	NN-0204-05	8
		0.6	CC-0204-06	8	CC-0204-06B	8	TT-0204-06	9	NN-0204-06	8
		0.7	CC-0204-07	8	CC-0204-07B	8	TT-0204-07	9	NN-0204-07	8
		0.8	CC-0204-08	8	CC-0204-08B	8	TT-0204-08	8	NN-0204-08	8
		0.9	CC-0204-09	8	CC-0204-09B	8	TT-0204-09	9	NN-0204-09	8
		1	CC-0204-10	8	CC-0204-10B	8	TT-0204-10	8	NN-0204-10	8
2.8	5	0.2	CC-2605-02	8	CC-2605-02B	8	TT-2605-02	8	NN-2605-02	8
		0.25	CC-2605-025	8	CC-2605-025B	8	TT-2605-025	8	NN-2605-025	8
		0.3	CC-2605-03	8	CC-2605-03B	8	TT-2605-03	8	NN-2605-03	8
		0.35	CC-2605-035	8	CC-2605-035B	8	TT-2605-035	8	NN-2605-035	8
		0.4	CC-2605-04	8	CC-2605-04B	8	TT-2605-04	8	NN-2605-04	8
		0.5	CC-2605-05	8	CC-2605-05B	8	TT-2605-05	8	NN-2605-05	8
		0.6	CC-2605-06	8	CC-2605-06B	8	TT-2605-06	9	NN-2605-06	8
		0.7	CC-2605-07	8	CC-2605-07B	8	TT-2605-07	9	NN-2605-07	8
		0.8	CC-2605-08	8	CC-2605-08B	8	TT-2605-08	9	NN-2605-08	8
		0.9	CC-2605-09	8	CC-2605-09B	8	TT-2605-09	10	NN-2605-09	8
		1	CC-2605-10	8	CC-2605-10B	8	TT-2605-10	9	NN-2605-10	8

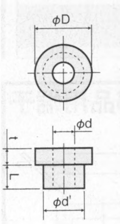
セットワッシャー



仕様

・品番	DDS	DDS-B	NNS	NNSR-B	TTS	NQS	PPSS	PES
・材質	ジュラコン®(POM)		ナイロン66	ナイロン6	PTFE	衝華吸収ナイロン	PSS	PEEK
・色	乳白色	黒色	半透明	黒	白色不透明	白色不透明	うす茶	うす茶
・熱変形温度	1.82Mpa…110℃		1.82Mpa…75℃	1.82Mpa…65℃	連続240℃不燃性	1.82Mpa …57℃	1.82Mpa…112℃	1.82Mpa…152℃
・UL規格	UL94-HB (材料)		UL94-HB (材料)	UL94-HB (材料)	UL94V-0 (材料)		UL94V-0 (相当品、材料)	UL94V-0 (材料)

金属ブッシュ 3,490規格

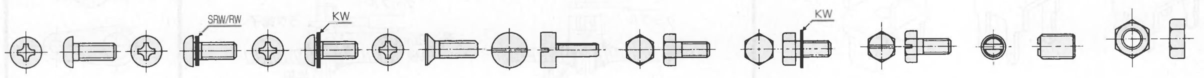


品番	材質
B-T	黄銅(Niメッキ)
B-TC	黄銅(メッキ無)
U-T	ステンレス
F-T	鉄(三価クロム)
L-T	アルミ(酸洗い)
L-TK	アルミ(無電解Ni)
L-TB	アルミ(黒アルマイト)

d	d'	D	t	L	黄銅(ニッケル)		黄銅(メッキ無)		ステンレス		鉄(三価クロム)		アルミ(酸洗い)		アルミ(無電解Ni)		アルミ(黒アルマイト)	
					品番	単価	品番	単価	品番	単価	品番	単価	品番	単価	品番	単価	品番	単価
3	4	5	0.8	0.5	B3040-5805T	22	B3040-5805TC	21	U3040-5805T	24	F3040-5805T	22	L3040-5805T	18	L3040-5805TK	28	L3040-5805TB	49
				1	B3040-5810T	22	B3040-5810TC	21	U3040-5810T	24	F3040-5810T	22	L3040-5810T	18	L3040-5810TK	29	L3040-5810TB	49
				1.5	B3040-5815T	22	B3040-5815TC	21	U3040-5815T	24	F3040-5815T	22	L3040-5815T	19	L3040-5815TK	29	L3040-5815TB	49
		6	1	0.5	B3040-6105T	23	B3040-6105TC	22	U3040-6105T	25	F3040-6105T	23	L3040-6105T	18	L3040-6105TK	29	L3040-6105TB	50
				1	B3040-6110T	23	B3040-6110TC	22	U3040-6110T	25	F3040-6110T	23	L3040-6110T	18	L3040-6110TK	29	L3040-6110TB	50
				1.5	B3040-6115T	23	B3040-6115TC	22	U3040-6115T	25	F3040-6115T	23	L3040-6115T	18	L3040-6115TK	29	L3040-6115TB	50
				2	B3040-6120T	23	B3040-6120TC	22	U3040-6120T	25	F3040-6120T	23	L3040-6120T	18	L3040-6120TK	30	L3040-6120TB	50
				2.5	B3040-6125T	23	B3040-6125TC	22	U3040-6125T	25	F3040-6125T	23	L3040-6125T	18	L3040-6125TK	30	L3040-6125TB	50
				3	B3040-6130T	23	B3040-6130TC	22	U3040-6130T	25	F3040-6130T	23	L3040-6130T	18	L3040-6130TK	30	L3040-6130TB	50
		7	0.8	0.5	B3040-7805T	23	B3040-7805TC	22	U3040-7805T	25	F3040-7805T	23	L3040-7805T	18	L3040-7805TK	29	L3040-7805TB	50
				1	B3040-7810T	23	B3040-7810TC	22	U3040-7810T	25	F3040-7810T	23	L3040-7810T	18	L3040-7810TK	30	L3040-7810TB	50

樹脂ネジ・ボルト・ナット 2,979規格

ナベ小ネジ(十字穴付)　ゴムワッシャー付　樹脂ワッシャー付　サラ小ネジ(十字穴付)　平小ネジ(-)十字穴付　六角ボルト　六角ボルト(ワッシャー付)　六角ボルト(スリ割付)　イモネジ　六角ナット



116,000規格
(多様化のニーズに対応)

50個〜50万個受注
(少量受注から大量受注)

規格商品で → 品質安定
最少必要数で → 資材負担減
毎日トラック便発送 → 短納期
116,000規格カタログで → 設計合理化
全製品単価カタログ掲載 → 見積合理化
50ケ特注品受注で → 開発合理化

取扱いラインナップ
製品仕様/価格/資料等は
カタログ・HPをご覧下さい

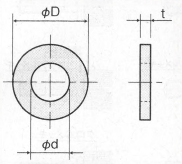
詳しくはこちら
廣杉計器

メカニカル＆エレクトロニクスパーツ
株式会社 廣杉計器
小ロット注文はヒロスギネット
044-870-8731 へ

取り扱い規格数 33,557規格

金属ワッシャー 12機種:7,768規格

プレス加工(量産対応)・切削加工(特寸対応可)

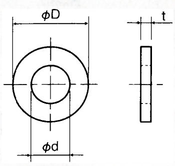


品番	材質
BBW	黄銅(ニッケル)
BBW-C	黄銅(メッキ無)
FFW	鉄(三価クロムクロメート)
FFW-N	鉄(無電解ニッケル)
FFW-B	鉄(黒色焼き付け処理)
AAW	アルミ
AAW-B	アルミ(黒アルマイト)
UUW	SUS303(脱脂)
UUW-H	SUS304(脱脂)
UUW-BH	SUS304(黒色焼き付け処理)
PBW	リン黄銅(メッキ無)
TTW	純チタン(脱脂)

d	D	t	SUS304(脱脂) UUW-H 品番	単価	黄銅(Niメッキ) BBW 品番	単価	鉄(三価クロム) FFW 品番	単価
3.2	6	0.1	UUW-0306-01H	17	BBW-0306-01	14	-	-
		0.2	UUW-0306-02H	17	BBW-0306-02	14	-	-
		0.3	UUW-0306-03H	17	BBW-0306-03	14	FFW-0306-03	16
		0.5	UUW-0306-05H	17	BBW-0306-05	14	FFW-0306-05	16
		0.8	UUW-0306-08H	17	BBW-0306-08	14	FFW-0306-08	16
		1	UUW-0306-10H	17	BBW-0306-10	14	FFW-0306-10	16
		1.5	UUW-0306-15H	85	BBW-0306-15	17	FFW-0306-15	23
		2	UUW-0306-20H	85	BBW-0306-20	18	FFW-0306-20	23
		2.5	UUW-0306-25H	86	BBW-0306-25	18	FFW-0306-25	23
		3	UUW-0306-30H	86	BBW-0306-30	18	FFW-0306-30	23
		3.5	UUW-0306-35H	86	BBW-0306-35	18	FFW-0306-35	23
		4	UUW-0306-40H	86	BBW-0306-40	18	FFW-0306-40	24
		4.5	UUW-0306-45H	87	BBW-0306-45	18	FFW-0306-45	24
		5	UUW-0306-50H	87	BBW-0306-50	18	FFW-0306-50	24
	7	0.1	UUW-0307-01H	17	BBW-0307-01	16	-	-
		0.2	UUW-0307-02H	17	BBW-0307-02	16	-	-
		0.3	UUW-0307-03H	17	BBW-0307-03	16	FFW-0307-03	16
		0.5	UUW-0307-05H	17	BBW-0307-05	16	FFW-0307-05	16
		0.8	UUW-0307-08H	17	BBW-0307-08	16	FFW-0307-08	16
		1	UUW-0307-10H	17	BBW-0307-10	16	FFW-0307-10	16
		1.5	UUW-0307-15H	88	BBW-0307-15	19	FFW-0307-15	23
		2	UUW-0307-20H	89	BBW-0307-20	19	FFW-0307-20	23
		2.5	UUW-0307-25H	89	BBW-0307-25	19	FFW-0307-25	23
		3	UUW-0307-30H	89	BBW-0307-30	19	FFW-0307-30	23
		3.5	UUW-0307-35H	90	BBW-0307-35	20	FFW-0307-35	23
		4	UUW-0307-40H	90	BBW-0307-40	20	FFW-0307-40	24
		4.5	UUW-0307-45H	90	BBW-0307-45	20	FFW-0307-45	24
		5	UUW-0307-50H	91	BBW-0307-50	20	FFW-0307-50	24

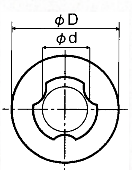
ゴムワッシャー 10機種:7,250規格

二次元カラー画像測定器で内径・外径
国際ゴム硬さ計(IRHD)で硬度を管理



品番	材質
CRW	CR(クロロプレンゴム)
CNW	CNR
NBW	NBR(ニトリルゴム)
EPW	EPDM(エチレンプロピレンゴム)
SIW	シリコンゴム50°
SIW-G	シリコンゴム70°
UREW	ウレタン
FLW	フッ素ゴム
HAW	ハネナイト®
HVW	ハネナイト®(V-0)

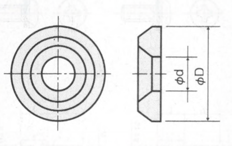
d	D	t	CRW(黒色) 品番	単価	SIW(半透明) 品番	単価	NBR(黒色) 品番	単価
3	5	0.5	CRW-0305-05	20	SIW-0305-05	26	NBW-0305-05	20
		1	CRW-0305-10	20	SIW-0305-10	26	NBW-0305-10	20
	6	0.5	CRW-0306-05	20	SIW-0306-05	26	NBW-0306-05	20
		1	CRW-0306-10	20	SIW-0306-10	26	NBW-0306-10	20
	7	0.5	CRW-0307-05	20	SIW-0307-05	26	NBW-0307-05	20
		1	CRW-0307-10	20	SIW-0307-10	26	NBW-0307-10	20
	8	0.5	CRW-0308-05	20	SIW-0308-05	26	NBW-0308-05	20
		1	CRW-0308-10	20	SIW-0308-10	26	NBW-0308-10	20
	9	0.5	CRW-0309-05	20	SIW-0309-05	26	NBW-0309-05	20
		1	CRW-0309-10	20	SIW-0309-10	26	NBW-0309-10	20
	10	0.5	CRW-0310-05	20	SIW-0310-05	26	NBW-0310-05	20
		1	CRW-0310-10	20	SIW-0310-10	26	NBW-0310-10	20
		1.5	CRW-0310-15	21	SIW-0310-15	29	NBW-0310-15	21
	11	0.5	CRW-0311-05	20	SIW-0311-05	26	NBW-0311-05	20
		1	CRW-0311-10	20	SIW-0311-10	26	NBW-0311-10	20
		1.5	CRW-0311-15	21	SIW-0311-15	29	NBW-0311-15	21
	12	0.5	CRW-0312-05	20	SIW-0312-05	26	NBW-0312-05	20
		1	CRW-0312-10	20	SIW-0312-10	26	NBW-0312-10	20
		1.5	CRW-0312-15	21	SIW-0312-15	29	NBW-0312-15	21
4	7	0.5	CRW-0407-05	20	SIW-0407-05	26	NBW-0407-05	20
		1	CRW-0407-10	20	SIW-0407-10	26	NBW-0407-10	20
	8	0.5	CRW-0408-05	20	SIW-0408-05	26	NBW-0408-05	20
		1	CRW-0408-10	20	SIW-0408-10	26	NBW-0408-10	20
	9	0.5	CRW-0409-05	20	SIW-0409-05	26	NBW-0409-05	20
		1	CRW-0409-10	20	SIW-0409-10	26	NBW-0409-10	20
	10	0.5	CRW-0410-05	20	SIW-0410-05	26	NBW-0410-05	20
		1	CRW-0410-10	20	SIW-0410-10	26	NBW-0410-10	20
		1.5	CRW-0410-15	21	SIW-0410-15	29	NBW-0410-15	21
	11	0.5	CRW-0411-05	20	SIW-0411-05	26	NBW-0411-05	20
		1	CRW-0411-10	20	SIW-0411-10	26	NBW-0411-10	20
		1.5	CRW-0411-15	21	SIW-0411-15	29	NBW-0411-15	21



PCWS

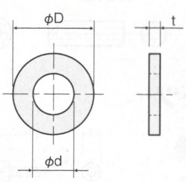
ポリカーボネート
透明
1.82Mpa…130℃
UL92V-2(材料)

ロゼットワッシャー



品番	材質
BRW	黄銅
URW	ステンレス
FRW-N	スチール
DRW	ジュラコン
DRW-B	黒ジュラコン
NRW	ナイロン

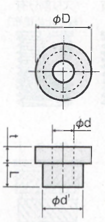
スラストワッシャー



仕様

・品番	LL
・材質	ポリスライダー
・色	黒
・UL規格	UL94-HB(材料)

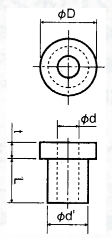
樹脂ブッシュ 2,409規格



品番	材質	品番	材質
D	ジュラコン	M	MCナイロン
D-B	黒ジュラコン	A	ABS
T	PTFE	A-B	ABS
Z	PBT	X	ベーク
PE	ピーク	G	ガラエポ
PE-M(成型品)	ピーク	Z-M(成型品)	PBT
PS-M(成型品)	PPS		

d	d'	D	t	L	ジュラコン 品番	単価	PTFE 品番	単価	ピーク 品番	単価
3	3.5	5	0.8	0.5	D3035-5805	12	T3035-5805	15	PE3035-5805	45
				1	D3035-5810	12	T3035-5810	15	PE3035-5810	45
				1.5	D3035-5815	12	T3035-5815	15	PE3035-5815	45
			1	0.5	D3035-5105	12	T3035-5105	15	PE3035-5105	45
				1	D3035-5110	12	T3035-5110	15	PE3035-5110	45
				1.5	D3035-5115	12	T3035-5115	15	PE3035-5115	45
		6	0.8	0.5	D3035-6805	12	T3035-6805	15	PE3035-6805	45
				1	D3035-6810	12	T3035-6810	15	PE3035-6810	45
				1.5	D3035-6815	12	T3035-6815	15	PE3035-6815	45
			1	0.5	D3035-6105	12	T3035-6105	15	PE3035-6105	45
				1	D3035-6110	12	T3035-6110	15	PE3035-6110	45
				1.5	D3035-6115	12	T3035-6115	15	PE3035-6115	45
				2	D3035-6120	12	T3035-6120	15	PE3035-6120	50

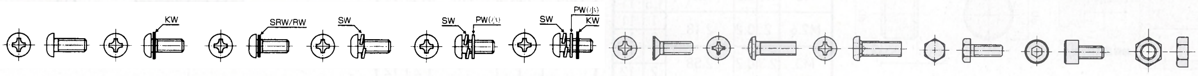
樹脂ツバ厚ブッシュ



L	ジュラコン 品番	単価
2	D3260-1220L	23
2.5	D3260-1225L	23
3	D3260-1230L	23
3.5	D3260-1235L	25
4	D3260-1240L	25
5	D3260-1250L	25
6	D3260-1260L	27
8	D3260-1280L	28
10	D3260-12100L	32
12	D3260-12120L	33

金属ネジ・ボルト・ナット 2,615規格

ナベ小ネジ　セットナベ小ネジ　セットナベ小ネジ　セットナベ小ネジ　セットナベ小ネジ　セットナベ小ネジ　サラ小ネジ　バインド小ネジ　精密マイクロネジ　六角ボルト　六角穴付きボルト　六角ナット



POWERTITE® 信頼のインバーター

上場企業、官公庁、また航空機搭載用としても納入実績があります。業界一の製品信頼性は最良であります。

工場出荷後ゼロ・ディフェクト

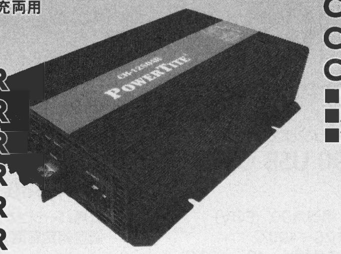
充電器

●鉛電池、密閉/液補充両用

多段充電器

CH-1225AR
CH-1235AR
CH-1250AR
CH-1280AR
CH-2415AR
CH-2425AR
CH-2440AR

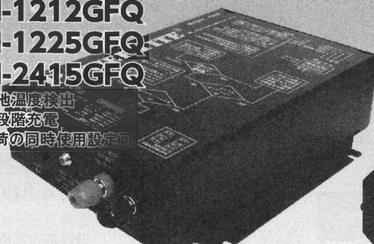
■電源モード、強制フロート動作設定可
■電池温度検出
■動作温度範囲広く、業務用に適す
■専用リモコン有り



PSE対応充電器

CH-1212GFQ
CH-1225GFQ
CH-2415GFQ

■電池温度検出
■三段階充電
■負荷の同時使用設定可



POWERTITE®

小型充電器

CH-1205

■三段階充電■逆接保護

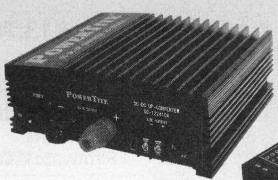


システム電圧	出力電流	型名	価格(税込)
DC12V系	5A	CH-1205	¥15,180
DC12V系	12.5A	CH-1212GFQ	¥50,600
DC12V系	22.5A	CH-1225GFQ	¥64,350
DC24V系	12.5A	CH-2415GFQ	¥65,780
DC12V系	25A	CH-1225AR	¥71,170
DC12V系	35A	CH-1235AR	¥80,410
DC12V系	50A	CH-1250AR	¥88,660
DC12V系	80A	CH-1280AR	¥125,400
DC24V系	12.5A	CH-2415AR	¥71,170
DC24V系	25A	CH-2425AR	¥88,660
DC24V系	40A	CH-2440AR	¥125,400

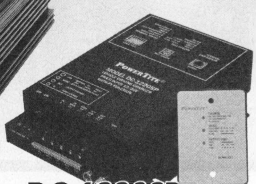
DC-DC コンバーター/走行充電器 DC-241240SBY DC-241240dd

●約90%の高効率●小型で薄型

POWERTITE®



DC-122410A
DC-241210S
DC-481240



DC-1220SPc
■昇降圧走行充電器

入力DC	出力DC電圧,最大電流	種類	型名	価格(税込)
24V系	13.8V,10A	ダウンコンバーター	DC-241210S	¥11,770
12V系	27.8V,10A	アップコンバーター	DC-122410A	¥42,020
48V系	13.8V,40A	ダウンコンバーター	DC-481240	¥61,930
24V系	2V/13.4V,40A	ダウンコンバーター	DC-241240dd	¥60,500
24V系	12V系,40A	走行充電器	DC-241240SBY	¥68,200
12～24V系	14.4V/14.7V,25A	昇降圧走行充電器	DC-1220SPc	¥46,200

太陽電池充放電コントローラー PV-1230D1AB PV-2412D1AB

●湿式/密閉式選択両用●夜間負荷出力機能

POWERTITE®



PV-1206A



PV-1212D1A



PV-1212C1A

システム電圧	最大充電電流	型名	価格(税込)
12V系	6A	PV-1206A	¥7,260
12V系	12A	PV-1212D1A	¥25,300
12V系	12A	PV-1212C1A	¥17,710
12V系	30A	PV-1230D1AB	¥34,980
24V系	12A	PV-2412D1AB	¥34,980

BC-2440V バッテリープロテクター

BC-0120A バッテリーアイソレーター



型名	入力DC	可能電流	価格(税込)
BC-2440V	12V/24V別	40A	¥11,660
BC-0120A	12V/24V共通※	120A	¥16,500

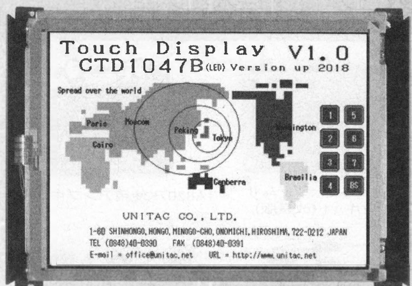
※BC-0120Aの入力DCは事前設定が必要です

■タッチディスプレイの特長

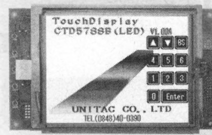
- 使い方を考えた親切な設計
- 豊富な種類
- 制御機器への入出力装置として最適
- 多彩な機能
- フラッシュメモリ増設により機能拡張

組み込みマイコンを制御する入力装置として最適です。

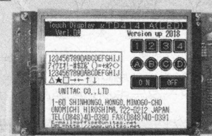
機能名称 / 型式		CTD3550α(LED)	μTD4141A(LED)	CTD5788B(LED)	CTD1047B(LED)
表示	LCD	3.5インチ TFTカラー	5.7インチ モノクロ	5.7インチ TFTカラー	10.4インチ TFTカラー
	ドット数	320×240			640×480
	最大文字数	40桁×30行			80桁×60行
有効表示寸法[mm]		70×52.5	116×87		211×158
キーマトリックス入力		10×6(320×240)			13×10(640×480)
キー寸法[mm]		7×8	12×14		15×15
フラッシュROM		──	オプション(54画面)		
供給電源		DC5V 0.4A	DC5V 0.5A	DC5V 0.8A	DC5V 1.1A
外形寸法[mm]		100×70×26	189×112×32	189×112×32	272×205×43
標準価格(税別)		39,000円	55,500円	75,000円	123,000円



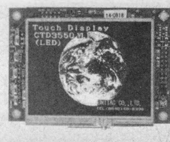
10.4インチTFTカラー **CTD1047B(LED)**



5.7インチTFTカラー **CTD5788B(LED)**



5.7インチモノクロ **μTD4141A(LED)**



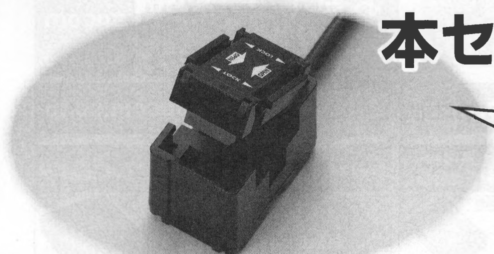
3.5インチTFTカラー **CTD3550α(LED)**

製造販売 株式会社 **ユニタック** 〒722-0212 広島県尾道市美ノ郷町本郷字新本郷1-60 TEL 0848-40-0390 FAX 0848-40-0391 Email: office@unitac.net https://www.unitac.net

---

U_RD ── Quest for the power measuring component

本センサに回路が組込めます!



例)●平均値整流回路を内蔵
●直流電流センサとして直流回路を内蔵

ホール式

分割型直流電流センサ
『HCS-8-20AP-CL』

- ●絶縁計測可能な直流分割型センサ
- ●±15V電源使用 ±4V出力(定格20A)
- ●OS温度ドリフトが小さい ±0.3mV/℃ TYP
- ●FS温度ドリフトが小さい ±0.05%/℃ TYP

サーボ式

分割型直流電流センサ
『HCS-18-50SC-CL』

- ●絶縁計測可能な直流分割型センサ
- ●±15V電源使用 ±4V出力(定格50A)
- ●OS温度ドリフトが小さい ±0.3mV/℃ TYP
- ●FS温度ドリフトが小さい ±30ppm/℃ TYP

電流計測の事なら何でもご相談ください。

まずは、お電話で。
(045)502-3111

製品底面が回路組込可能な構造となっているため、同形状にて様々なセンサの製作が可能。また、回路付きにすることで、省配線を実現。

電流センサ&電力関連機器の専門メーカー

株式会社 **ユー・アール・ディー** 〒230-0045 横浜市鶴見区末広町1-1-52

E-mail ▶ info@u-rd.com



会員募集！(ポイントで値引き)入会料無料 会員様は毎月25日・26日のお買い物はポイント2倍！！
スカイベリージャムII
組立キット(改良版)
TA8207K使用アンプキット
RGB導光板ユニットキット（面発光）
フルカラーLED表示ユニットキット
スカイベリーカーゴ・トレーサ
赤外線センサー
ボード付属・キット品
乾電池でハイパワーLED点灯キット
ロジックLED点滅回路キット
電子工作キットが
多数取り揃え!!
携帯ソーラー充電器キット
音と光のコラボレーションキット
Arduino用UNO R3
スターターキット互換品
ハンダ付け
練習基板キット(部品付)
ソーラー駆動LED豆電球点灯キット
面実装LED照明キット
測距センサ付
ロボットカー・ベースキット
店舗リニューアルオープン致しました！！店舗限定の商品多数ございます。（目玉商品多数有り）
上記以外のパーツ及び
最新情報はこちら 新ホームページ
http://www.kashinoki.shop
通販サイトはクレジット決済・Amazom pay対応
店舗はクレジット決済・QR決済・電子マネー決済対応
エレクトロニクスの総合商社 藤商電子(株)販売委託
KSK
樫木総業株式会社
KASHINOKISOGYO CO.,LTD.
営業本部・〒121-0055東京都足立区加平3-18-8
TEL.03-5682-0651（代）・FAX.03+5682-0652
【お振込は】三菱UFJ銀行亀有支店（普通）1585356
送料 送料は重量、形状により異なります。半導体は5,500以上、半導体以外は11,000円以上お買い上げの場合送料無料。詳しくはお問合せください。
★ご注文はお電話、FAX、E-Mail
等で承ります。
E-mail：ksk@kashinoki.co.jp
★ホームページは毎週更新致します。
★特価コーナーが増設されました。是非ご覧ください。
★お問合せは、すべて営業本部でお願い致します。

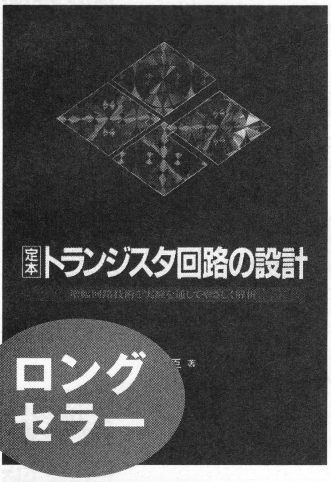


おかげさまで
工業用向け40年間
安定供給
実績あります
NEW
令和8年も
続々開発!!
お試し
大歓迎
SACOM
シリアル通信
信号・変換器のことなら
http://www.sacom.co.jp/
お問い合わせは
info@sacom.co.jp
RS232C
延長ユニット
NEW 付属ACアダプターで
A側からB側へ給電
B側給電
不要
市販LANケーブルで
最大1.2km
延長可能
ユニット型番
KS-232C-EXT ¥45,980（税込）
（KS-232C-EXT-A / KS-232C-EXT-B）
RS232C/
光通信変換器
-20～70℃
DC10～32V
SS-OPT-232-DC
¥49,500（税込）
LAN⇔
RS232C
ACアダプタ
SS-LAN-232C-RJ45-DS9P
¥39,820（税込）
LAN⇔
RS422
絶縁型
ACアダプタ
SS-LAN-422i-T6P
¥39,820（税込）
LAN⇔
RS485
絶縁型
ACアダプタ
SS-LAN-485i-T6P
¥39,820（税込）
LAN⇔RS232C RS422 2線4線485
絶縁型
-20～70℃
AC100～240V
SS-LAN-4248I-2
¥57,200（税込）
LAN⇔232C 422/TTL 2線485 変換
絶縁型
-20～70℃
AC100～240V
SS-LAN-232CTTL4248-AC
¥57,200（税込）
TTL⇔232 422 変換
ACアダプタ
SS-232CTTL422-ADP
¥37,950（税込）
RS232C⇔
RS422変換器（制御線サポート）
非絶縁型
CTS
/RTS
ACアダプタ
KS-1-HSD
¥22,990（税込）
ロングセラー コネクタ式
ACアダプタ
KS-1-HS
¥22,000（税込）
ロングセラー コネクタ式
AC100V
KS-10P-HS
¥28,600（税込）
ロングセラー 端子台式
AC100V
KS-10PT-HS
¥33,000（税込）
ロングセラー 端子台式
絶縁型
AC100V
KS-10PTI
¥39,600（税込）
RS232C⇔
RS422端子台型変換
絶縁型
ACアダプタ
KS-422i-T6P
¥25,300（税込）
絶縁型
-20～70℃
DC10～32V
SS-422i-TR-DC
¥40,370（税込）
RS422⇒スター方向
2ch・5ch分配/延長
NEW 絶縁型
2ch
DC10～25V
SS-422i-MD2P-DC
¥38,500（税込）
NEW 絶縁型
5ch
AC90～250V
SS-422i MD5P-AC
¥79,200（税込）
スター接続
RS485ハブ
NEW 絶縁型
延長
ACアダプタ
SS-485iRP-STAR-3PT-ADP
¥71,500（税込）
RS232C⇔
2線式RS485変換器
非絶縁型
市販LAN
ケーブル
ワンタッチ
電源伝送可
ACアダプタ RJ45 2ケタイプ
KS-485N-RJ45W
¥22,990（税込）
NEW
DC10～25V 両端M3端子
KS-485N-T-DC
¥25,300（税込）
ロングセラー 端子台式
絶縁型
AC100V
KS-485PTI
¥41,800（税込）
USB-HUB
電源供給リモートでON/OFF
NEW
4ポート
USB3.0
抜き差しせず
接続ON/OFF
ACアダプタ
USB-HUBV3-VC-4P-ADP
¥49,500（税込）
大容量
USB-HUB
1ポート2A
最大3.5A
4ポート
USB3.0
ACアダプタ
USB-HUBV3-4P-ADP
¥38,500（税込）
14ポート
USB3.0
1ポート2A
最大16A
USB-HUBV3-14P-20A
¥132,000（税込）
システムサコム工業株式会社
〒130-0021 東京都墨田区緑一丁目22番5号 州ビル4階
TEL. 03-6659-9261 FAX. 03-6659-9264

定本シリーズ　　　　　　　　　　　　　　　　　　好評発売中

増幅回路技術を実験を通してやさしく解析

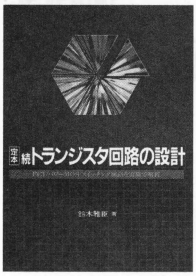
定本 トランジスタ回路の設計



ロングセラー

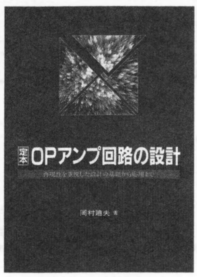
鈴木 雅臣 著
A5判 324ページ
定価2,350円
JAN9784789830485

今，ハードウェア技術者に不足していること… それは自分の手で回路をじっくりと実験して考察する時間です．本書はそんな多忙な技術者，あるいは技術者をめざす人のためのとてもわかりやすいトランジスタ回路の本です．たぶん本邦最後のトランジスタ回路の解説書です．



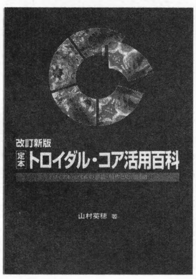
定本 続トランジスタ回路の設計

鈴木 雅臣 著
A5判 360ページ
定価2,883円
JAN9784789830478



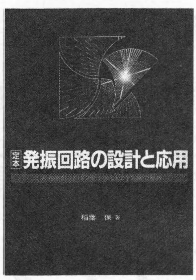
定本 OPアンプ回路の設計

岡村 廸夫 著
A5判 424ページ
定価2,990円
JAN9784789830508



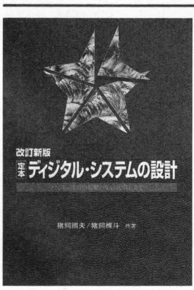
改訂新版 定本 トロイダル・コア活用百科

山村 英穂 著
A5判 528ページ
定価3,520円
JAN9784789830676　★電子書籍版あり



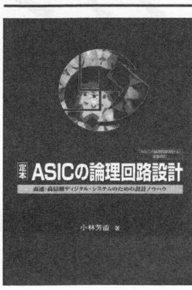
定本 発振回路の設計と応用【オンデマンド版】

稲葉 保 著
A5判 336ページ
定価3,740円
JAN9784789852432



改訂新版 定本 ディジタル・システムの設計【オンデマンド版】

猪飼 國夫／猪飼 維斗 共著
A5判 400ページ
定価3,520円
JAN9784789852753



定本 ASICの論理回路設計【オンデマンド版】

小林 芳直 著
A5判 344ページ
定価2,860円
JAN9784789852272

CQ出版社　　　　　　　　　　　　　　　　https://shop.cqpub.co.jp/

マイコン活用シリーズ

I^2C, SPI接続, センサ, モータ, LCD, SDカード, Wi-Fi接続のスマホで制御

Arduinoマイコン 基礎から学ぶ実践回路講座

神崎 康宏 著
B5変型判 368ページ
定価3,520円
JAN9784789842259



Arduinoが誕生してからまもなく20年になります．Arduinoは技術者ではない初心者や学生にも理解しやすいワンボードマイコンです．それでいながら，最近の新しいモデルは，本格的なシステム構築の中核となる能力を持っています．

Arduinoは，高性能になっても従来と同様に初心者に優しいマイコンです．

本書に掲載した順にテスト回路を作り，データシートなどを調べながら動作確認を繰り返せば，Arduinoを利用した新しいシステムも作れるようになります．



IPネットワーク通信プログラム入門

国野 亘 著
B5変型判 256ページ
定価3,300円
JAN9784789842242



動かして学ぶ CAN通信 【オンデマンド版】

中尾 司 著
B5変型判 200ページ
定価3,300円
JAN9784789853026



H8/Tinyマイコン 完璧マニュアル 【オンデマンド版】

島田 義人 編著
B5変型判 400ページ
定価3,300円
JAN9784789852845　CD-ROM付き



Wi-Fi/Bluetooth/ZigBee無線用 Raspberry Pi プログラム全集

国野 亘 著
B5変型判 352ページ
定価3,520円
JAN9784789842235　CD-ROM 1枚付き



定番！ARMキット＆PIC用 Cプログラムで いきなりマイコン制御 [DVD-ROM付き]

芹井 滋喜 著
B5変型判 256ページ
定価2,970円
JAN9784789842228　DVD-ROM 1枚付き



ZigBee/Wi-Fi/Bluetooth無線用 Arduino プログラム全集

国野 亘 著
B5変型判 416ページ
定価3,960円
JAN9784789842211　CD-ROM 1枚付き

CQ出版社　https://shop.cqpub.co.jp/

役にたつエレクトロニクスの総合誌

トランジスタ技術

■トランジスタ技術とは

トランジスタ技術は，国内でもっとも多くの人々に親しまれているエレクトロニクスの総合誌です．これから注目のエレクトロニクス技術を，実験などを交えてわかりやすく実践的に紹介しています．毎月10日発売．

公式ウェブ・サイト

X @ToragiCQ



https://x.com/toragiCQ

Facebook @ToragiCQ



https://www.facebook.com/toragiCQ/

SNSなど

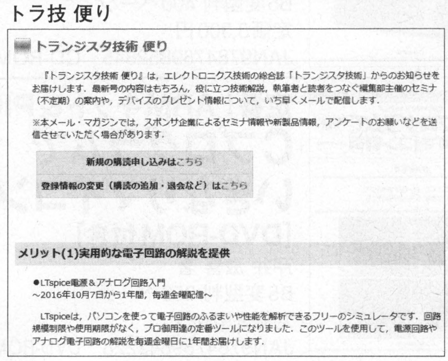
イベントSNS connpass



トラ技のイベントの通知が届きます

https://toragi.connpass.com/

メルマガ



https://cc.cqpub.co.jp/system/contents/6/

トランジスタ技術の電子版

■トランジスタ技術電子版の入手方法

トランジスタ技術の電子版はCQ出版のオンライン・ショップから入手できます(付録が付かない号もあります).

https://cc.cqpub.co.jp/lib/system/doclib_search/c=1113/

■年間CD-ROM版

トランジスタ技術には，各年度の記事(電子版)を収録したCD-ROM版があります(1999年版から毎年あります).

https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/41/41961.html



2025年12月号
電波と回路のススメ
MHz～GHzを操る!



2025年11月号
チョコッと便利が大集合!
電子回路をはじめよう



2025年10月号
今マイコンはArduinoが最強説
【別冊付録】



2025年9月号
プロのオーディオ回路
必見! 回路シミュレーションの新常識



2025年8月号
夏の回路製作大集合
エレキ万博2025



2025年7月号
ソニーの超小型コンピュータ
Spresense



2025年6月号
プロ並み入門!
自分だけの実験ラボ



2025年5月号
Anker活用!
モバイル・バッテリ電子回路



2025年4月号
オームの法則の現実から!
電子回路入門&検定



2025年3月号
Win11対応! 新USB 3種の神器
【別冊付録】



2025年2月号
小型革命! はじめてのプリント基板設計【別冊付録】

…

詳細や他の号

■トランジスタ技術のウェブ・サイト

https://toragi.cqpub.co.jp/

トラ技SPECIALの電子版

■トランジスタ技術SPECIAL電子版の入手方法

トランジスタ技術SPECIAL電子版の各巻は，CQ出版のオンライン・ショップから入手できます．

https://cc.cqpub.co.jp/lib/system/doclib_search/c=1118/

■ちょっとお得な年間予約購読

トランジスタ技術SPECIAL(紙版)には，ちょっとお得になる年間予約購読があります(電子版は検討中)．

https://www.cqpub.co.jp/nenkan.htm



No.172　電波とくふうの
ラジオ回路



No.171　ラズパイからはじめる
科学計測



No.170　教科書付き
小型バッテリ電源回路



No.169　電子回路設計
ツール大全［DVD2枚付き］



No.168　パワエレ回路技術
部品特性から入門



No.167　はじめの一歩！
OPアンプ回路設計



No.166　実験でつかむ
電子回路と数学



No.165　モータ大図鑑
メカニズムの研究



No.164　音波・超音波の
エレクトロニクス入門



No.163　ラズパイI/O制御
図解 完全マスタ



No.162　エレクトロニクス
設計便利帳101

…

詳細や他の巻

■トラ技SPECIALのウェブ・サイト

https://www.cqpub.co.jp/trs/index.htm

トラ技ジュニアの電子版

■学生さん無料の小冊子「トラ技ジュニア」

トラ技ジュニアとは，学生さんに無料でお届けしているトランジスタ技術小冊子です．年間4回発行し，申し込んでいただいた先生に郵送しています．社会人の方やバック・ナンバー希望の方は，購入も可能です．
https://toragijr.cqpub.co.jp/about/#sec02

■トラ技ジュニア電子版の入手方法

トラ技ジュニア電子版はCQ出版のオンライン・ショップから購入することもできます．
https://cc.cqpub.co.jp/lib/system/doclib_search/c=1106/



No.63 安全に！ リチウム・イオン・バッテリ回路の製作



No.62 宇宙と3000円で遊ぶ！ 人工衛星の電波をキャッチ



No.61 日本全国！ 電波時計用40kHz受信機の製作



No.60 回路設計に今どき小型モジュールのススメ



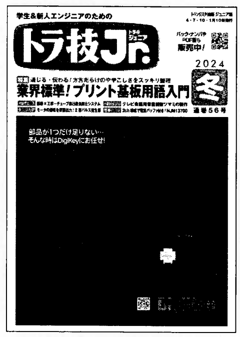
No.59 標準GPSとは桁ちがい！ cm級RTK測位入門



No.58 高精度cm級GPS自律走行ロボの製作



No.57 新定番！ Arduino Uno R4電子工作



No.56 業界標準！ プリント基板用語入門



No.55 基本3大測定器の正しい使い方



No.54 ロボット開発の要「ギヤ＆歯車」入門



No.53 要点マスタ 確実に動く電子回路入門

…

詳細や他の巻

■トラ技ジュニアのウェブ・サイト

https://toragijr.cqpub.co.jp/

Interfaceの電子版

■Interface電子版の入手方法

Interfaceの電子版はCQ出版のオンライン・ショップから入手できます(付録が付かない号もあります).

https://cc.cqpub.co.jp/lib/system/doclib_search/c=1109/

■年間CD-ROM版

Interfaceには，各年度の記事(電子版)を収録したCD-ROM版があります(2001年版から毎年あります).

https://cc.cqpub.co.jp/system/jump/811/



2026年1月号
AIで異常検知
時系列/画像/ログ【別冊付録】



2025年12月号
自分専用！ LLMの作り方
【別冊付録】



2025年11月号
最新CPU Q&A 100
【別冊付録】



2025年10月号
Pythonで1行ずつ学ぶ
ネットワーク



2025年9月号
モータ制御
プログラミング入門



2025年8月号
Pythonで体験！
はじめての暗号



2025年7月号
プログラム改善
ビフォーアフター[技100]



2025年6月号
GPU&NPUプログラミング
【別冊付録】



2025年5月号
Pythonで体験！ LiDAR
プログラミング【別冊付録】



2025年4月号
Pythonで学ぶ制御
【別冊付録】



2025年3月号
仕事のための生成AI
【別冊付録】

…

詳細や他の巻

■Interfaceのウェブ・サイト

https://interface.cqpub.co.jp/

アマチュア無線専門誌

CQ ham radioの各号

■CQ ham radioの入手方法

CQ ham radioの各号は，書店やCQ出版のオンライン・ショップから入手できます（電子版はございません）．

https://cc.cqpub.co.jp/system/jump/717/

■別冊CQ ham radio QEXの入手方法

別冊CQ ham radio QEXの各号は，書店やCQ出版のオンライン・ショップから入手できます（電子版はございません）．

https://cc.cqpub.co.jp/system/jump/810/



2025年12月号
現代版アマチュア無線の楽しみ方【別冊付録】



2025年11月号
アマチュア無線機の便利機能活用法【特別付録】



2025年10月号
HF運用お役立ちガイド【別冊付録】



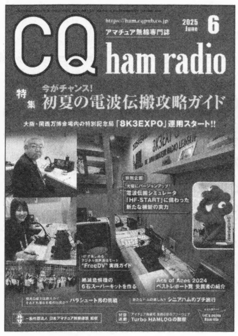
2025年9月号
DIYで楽しむアマチュア無線【別冊付録】



2025年8月号
小型アマチュア無線機入門ガイド【別冊付録】



2025年7月号
モールス通信の魅力【別冊付録】



2025年6月号
初夏の電波伝搬攻略ガイド



2025年5月号
私のお気に入りアンテナ



2025年4月号
春のポータブル運用ガイド



2025年3月号
アンテナチューナー活用ガイド2025【別冊付録】



2025年2月号
アマチュア無線オペレーションガイド2025

…

詳細や他の号

■CQ ham radioのウェブ・サイト

https://ham.cqpub.co.jp/

CQエレクトロニクス・セミナのご案内

2025年12月～2026年1月

エレクトロニクス・セミナ　検索
https://seminar.cqpub.co.jp/

超入門(2日コース)～手ぶらでOK! 実習・STM32マイコンの始め方(C言語)【割引プランあり】
ビギナ向け　実習セミナ　KIT付き

―― GPIO, タイマ, UART, A/D変換, D/A変換, I2C, SPI

2025/12/23(火)～24(水)《2日コース》 受講料 35000円 【ES25-0112】
講師：組み込みの里電子工作オープンラボ　西山 茂丸 氏

★本セミナは, STM32マイコンが搭載されたNucleoF446を用いて, LED, 液晶表示, アナログ・センサ, I2Cセンサ, シリアルEEPROM, UARTを制御するプログラム開発をC言語で行います.
■HAL生成サンプルでプログラミング演習・デバッガ説明 / タイマ割り込み / A/D制御　温度センサ ほか
●対象聴講者
・C言語についての基本的理解がある方
・STM32マイコンで組み込みマイコンソフト開発に携わることになった方
・ハード制御に必要なHAL層生成手順について理解したい方

高校/大学生限定! 動かして学ぶはじめてのプログラミング&電子工作【実習教材お持ち帰り】
ビギナ向け　実習セミナ　KIT付き

―― 初心者歓迎! プログラミングと回路作りを体験しませんか? 経験豊富なCQセミナ専任講師が丁寧にサポートします

2025/12/26(金)《1日コース》 受講料 5000円 【ES25-0114】
講師：CQエレクトロニクス・セミナ専任講師　島田 義人 氏

★本セミナは「プログラミング」と「電子工作」を組み合わせた体験型ワークショップです. 座学だけでなく, 実際に手を動かしてモノづくりを体験することで, プログラミングの面白さや電子回路の仕組みを楽しく学ぶことができます.
■micro:bit ってなに? / プログラミングの基本 / LEDを点滅させてみよう ほか
●対象聴講者
・高等学校の生徒／大学生限定

実習・基礎から学ぶRF回路設計「超」入門
ビギナ向け　実習セミナ　講師実演

―― フリーシミュレータ(QucsStudio)実習でRF回路設計をマスター

2026/1/14(水)《1日コース》 受講料 24000円
【ES25-0115】
講師：高周波回路設計, EMC対策コンサルタント　川口 正 氏

★本セミナでは, QucsStudioを活用して基本となるSパラメータとスミスチャートの基礎について実習するので, これからRF回路設計に取り組む場合でも役立つ内容となっています.
■高周波は低周波と何がちがうか / 高周波での信号をみる / 回路の反射とSパラメータとの関係(実習)ほか.
●対象聴講者
・RF回路設計に興味のある方. RF回路設計入門レベルで

手ぶらでOK! 実習・1日でわかる! CANプログラミング入門【割引プラン有】
ビギナ向け　実習セミナ　KIT付き

―― マイコンモジュールでマスタするプロトコルの基本と通信プログラムの作り方

2026/1/16(金)《1日コース》 受講料 38500円
【ES25-0103】
講師：設計コンサルタント　横溝 憲治 氏

★本セミナでは, CANのプロトコル, データフォーマット等の基本的な仕組みを解説し, マイコンによる実装例を紹介します.
■CANプロトコル / Raspberry PiでのCAN通信 / マイコンでのCAN通信 ほか
●対象聴講者
・CAN通信に興味のある方
・マイコンでCAN通信をしてみたい方
・CANを組み込み機器に応用したい方

ビギナ大歓迎! 実習・NPU搭載AIカメラで作る人流カウンタ【ラズパイAIカメラ&生成AI有償版期限付き使用権付き】
ビギナ向け　実習セミナ　KIT付き

―― CPUで推論するより10倍速い! Raspberry Pi AI カメラとPythonウェブ・アプリケーションでサッ

2026/1/20(火)《1日コース》 受講料 43500円 【ES25-0125】
講師：テックマインド 代表 / 澁谷 慎太郎 氏, 個人開発者 / 高橋 紀光 氏

★当セミナはInterface誌2025年6月号掲載「NPU搭載AIカメラで作る人流カウンタ」記事連動セミナです. このセミナでは, 座学とハンズオンのハイブリッドで, 記事で紹介している人流カウンタをWebアプリとして作ってみます.
●講演の目標
・Raspberry Pi AI カメラ(IMX500)の基礎がわかる. また, これを活用して, 実現できることがわかる
・生成AIを使ってWebアプリケーションを作る基本的な流れとプロンプトが理解できる
●対象聴講者
・基本的なPython文法やLinuxコマンドを理解している人
・エッジAIの開発に興味のある人
・組み込み機器上でも動く画像認識AIを試してみたい人

実習・Verilog HDLによるFPGA開発・設計入門【FPGAボード使用】
実習セミナ　演習あり

―― 論理回路の基礎から大規模回路の設計手法まで

2026/1/22(木)～23(金)《2日コース》 受講料 38000円 【ES25-0118】
講師：バンテクノ　萬代 慶昭 氏

★2日間でVerilog HDL設計, Quartus Prime開発環境, ModelSimシミュレーション手法に必要な知識やノウハウについて, 実務経験豊富な講師が実習を取り入れながらていねいに解説します.
■ディジタル回路の基本設計を学習 / Verilog HDLの基礎 / ModelSimシミュレータの使い方を実習 ほか
●対象聴講者
・基本論理素子の基本動作を知っている方
・2進数, 10進数, 16進数を知っている方
・ブール代数について教科書などで学んだことがある方

参加ご希望の方は, 詳細をWebサイト(https://seminar.cqpub.co.jp/)にてご確認のうえ, お申し込みください. 折り返し, 請求書を送付いたします.
E-Mail, FAXでもお申し込みいただけます. ①セミナ・コード, ②参加者の氏名, ③住所, ④電話番号, ⑤FAX番号を明記し, 下記までお申し込みください.

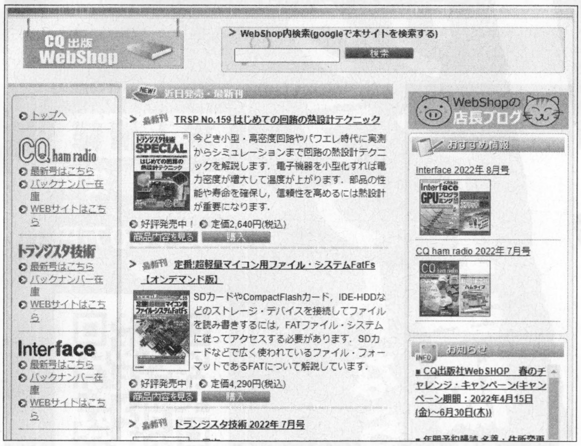
E-Mail：seminar@cqpub.co.jp
TEL：03-5395-2125(土日のご連絡はE-Mailでお願いします)
〒112-8619
東京都文京区千石4-29-14　CQ出版株式会社内
エレクトロニクス・セミナ事務局

【受講料のお支払いについてお願い】
●原則として, 開催前日までにお支払いいただきますようお願い申し上げます.
振込先：三菱UFJ銀行 巣鴨支店 普通 1016128
(口座名：「CQ出版株式会社」)
※振込手数料はお客様のご負担となります.
●申し込み受付後に, やむを得ずキャンセルされる場合は, 必ずE-MailまたはFAXでお知らせください. キャンセルの場合は, 下記の通り費用を申し受けますので, あらかじめご了承ください.
・開催日の1週間前(同じ曜日)～当日のキャンセル, または連絡なしに欠席される場合：受講料の100%
●セミナ終了後は, 理由の如何にかかわらず, 受講料のご返金はできませんのでご了承ください.

CQ出版社　エレクトロニクス・セミナ事務局　E-Mail:seminar@cqpub.co.jp

CQ出版WebShop

https://shop.cqpub.co.jp/

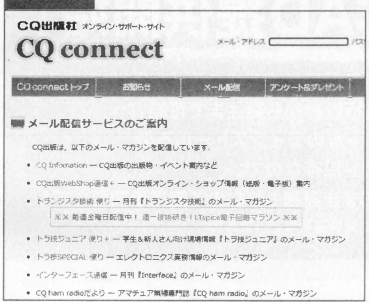


書籍・雑誌

オリジナル・キット

年間購読の申込

メルマガ登録



◀購読無料

https://cc.cqpub.co.jp/system/contents/12/

電子版Shop



◀書庫＆販売

https://cc.cqpub.co.jp/lib/

X公式一覧

- CQ出版社【公式】 @CQ_connect
- CQ ham radio @CQ_ham_radio
- トランジスタ技術 @toragiCQ
- Interface @If_CQ
- トランジスタ技術SPECIAL @toragiSP
- トラ技ジュニア @toragiJr
- CQエレクトロニクス・セミナ @CqSeminar
- 製品情報配信サイト「ECN」 @ECN_cqpub

■ **個人情報の取り扱いについて**

ご注文の際は，当社の情報セキュリティをご確認の上，お申込み願います．

■ **書店でのご購入／ご注文**　常備店一覧

全国有名書店でご購入でき，品切れの際はお取り寄せできます．10～25日くらいかかりますが送料はかかりません．

■ **電話でのご注文／ご購入**

TEL：03-5395-2141

郵便振替またはコンビニ払いにてお支払いいただけます．

■ **CQ出版社の直売所**

東京都文京区千石4-29-14　CQビル2階　地図はこちら

03-5395-2141

営業日　平日(月～金)　10：00～17：00

定休日　土曜，日曜，祝日，年末年始

CQ出版社　https://shop.cqpub.co.jp/

雑誌 06663-1

4912066630168
01000

トランジスタ技術 2026年1月号
昭和59年12月26日第3種郵便物認可
令和8年1月1日発行（毎月1回1日発行） 第63巻 第1号 通巻第736号
CQ出版社
〒112-8619 東京都文京区千石4-29-14
TEL.(販売)03-5395-2141 (広告)03-5395-2132
定価1,100円（本体1,000円）⑩